

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет машиностроения
Кафедра «Мехатроника и автоматизация»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой, к.т.н.,
доцент

_____ В.Р. Гасияров
_____ 2020 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА
ЮУрГУ 15.03.06.2020.575 ПЗ (ВКР)

Разработка роботизированной системы замены биты фрезерного станка Heskert
СМК 1250 участка производства деталей компрессорных установок
предприятия ООО «ЧКЗ»

Консультант по экономике
Профессор, д.э.н.

_____ Е.В. Кучина

Руководитель работы
Доцент, к.т.н.

_____ А.С. Маклаков

Нормоконтролер
Преподаватель

_____ О.А. Гасиярова

Автор работы
студент группы П-456

_____ И.Д. Лутохин
_____ 2020 г.

Консультант по проверке ВКР
на оригинальность
Ст. преподаватель

_____ С.С. Воронин

АННОТАЦИЯ

Лутохин И.Д. Разработка роботизированной системы замены биты фрезерного станка Heckert CWK 1250 участка производства деталей компрессорных установок предприятия ООО «ЧКЗ» Челябинск: ЮУрГУ, П-456; 2020, 70 с., 30 ил., 14 табл., библиогр. список – 11 наим.

Составлена характеристика технологического оборудования производства ООО «ЧКЗ». Принято решение о модернизации фрезерного обрабатывающего центра Heckert CWK 1250, изучены основные его параметры и определены несовершенства данной системы – сложная замена обрабатывающей биты станка. Разработано решение на основе робота Кука и консоли для его перемещения KL 4000. Подобрано оборудование для реализации обратных связей и контроля положения. Подобрана система взаимодействия обрабатывающего центра и разрабатываемой мехатронной системы.

Разработана структурная и функциональные системы САР двигателя консоли для перемещения робота. В среде Matlab создана математическая модель, отображающая работу данной системы.

После реконструкции увеличивается объем выпускаемой продукции на 10%. Срок окупаемости составляет 3 года.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОПИСАНИЕ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	7
1.1 Характеристика цеха, описание технологического процесса работы механизма.....	7
1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма.....	10
1.3 Требования к приводам	15
1.4 Выбор системы привода.....	16
1.5 Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы	18
1.6 Выбор основного силового оборудования	22
1.7 Защита привода, расчет уставок защитных устройств	24
2 РАЗРАБОТКА САУ	32
2.1 Разработка архитектуры систем автоматизации.....	32
2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат	35
2.3 Выбор и разработка функциональной системы САР привода проектируемого агрегата	38
2.4 Разработка контура регулирования технологических координат.....	41
2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода.....	43
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ	55
3.1 Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции	55
3.2 Расчёт производственной программы цеха.....	55
3.3 Расчет сметы капитальных затрат.....	58
3.4 Расчет РСЭО до внедрения проектируемых мероприятий.....	60
3.5 Расходы на обслуживание.....	61
3.6 Расчет прибыли и показателей рентабельности итоговых показателей	64
3.7 Расчет срока окупаемости проекта.....	65
3.8 Сводная таблица технико-экономических показателей.....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	70

ВВЕДЕНИЕ

Применение промышленных роботов позволяет эффективнее выполнять работу и повысить быстродействие производственной линии. В настоящее время уже существуют полностью автоматизированные линии, где роботы выполняют абсолютно все технологические операции. Также осталось производство, где абсолютно все процессы производит человек. Чтобы увеличить качество и количество выпускаемой продукции можно внедрять роботизированные комплексы. Например, повысить эффективность фрезерного станка, установив робота манипулятора, который будет помещать заготовки деталей в станок и забирать уже обработанные детали. Таким образом уменьшится время на перемещение заготовки, тем самым повышая количество произведенных деталей.

Почти всё массовое производство автомобилей построено на полной или частичной роботизации. Там роботы взаимодействуют со станками по производству деталей, конвейерами, обрабатывающими центрами. Также они выполняют сварку и частичную сборку готовой продукции. Такие промышленные линии способны работать круглосуточно, производя большой объем продукции. Этот пример показывает эффективность использования роботов в производстве.

Промышленные роботы выполняют различные технологические операции, включающие в себя сварочные работы, ковка, сверление, покраска и др. Также они находят применение в выполнении различных вспомогательных технологических операций, как например, выгрузка или загрузка оборудования и сопутствующих элементов. Для повышения эффективности производства промышленные роботы интегрируются в общую технологическую линию предприятия в совокупности с другими автоматизированными устройствами.

Основным недостатком фрезерного обрабатывающего центра Neckert CWK 1250 является необходимость замены быты массой 40 кг. На выполнение данной

операции требуется большое количество времени и привлечения двух работников цеха. Данное несовершенство было решено исправить.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка роботизированной системы для замены биты. Для успешного выполнения работы поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ технологического процесса фрезерного обрабатывающего центра Neckert CWK 1250;
2. Выбрать основных элементов и разработать архитектуру системы автоматизации;
3. Разработать САУ и смоделировать технологический процесс;
4. Произвести технико-экономический расчет и подтвердить экономическую целесообразность реконструкции.

Данное усовершенствование поможет увеличить количество обрабатываемых деталей за смену, что повысит количество выпускаемой продукции.

1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОПИСАНИЕ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Характеристика цеха, описание технологического процесса работы механизма

На челябинском компрессорном заводе существует несколько автоматизированных производственных линий для изготовления деталей. На них используются комплексы с различной степенью автоматизации технологического процесса.

Технологические лазерные комплексы «BYSTAR 4020» обеспечивают высокую точность и скорость резки без ограничения по геометрической сложности и минимальное деформирование металла. На рисунке 1 представлен комплекс «BYSTAR 4020».



Рисунок 1. Лазерный технологический комплекс «BYSTAR 4020»

Пресс листогибочный «BEYELER PR 100x2550» обеспечивает возможность формирования точных гнутых профилей сложного сечения.

На рисунке 2 представлен один из двух имеющихся на производстве листогибочных прессов «BEYELER PR [1].



Рисунок 2. Листогибочный пресс «BEYELER PR 100x2550»

Порошковая линия окраски «Taiss» имеет многоуровневую подготовку окрашиваемой поверхности перед покраской: обезжиривание, фосфатация, мойка и т. д. Окрашенные по такой технологии детали для компрессорных установок сохраняют отличное лакокрасочное покрытие на всем протяжении службы установок. Она представлена на рисунке 3 [1].



Рисунок 3. Линия порошковой окраски «Taiss»

Обрабатывающие центры с ЧПУ от мировых лидеров: DECKEL-MAHO, Mazak, FEELER, Takisawa реализуют высокую скорость и точность обработки [1]. Вместе с квалифицированным персоналом данное оборудование позволяет производить детали компрессоров очень высокого качества. Обрабатывающий центр Mazak представлен на рисунке 4.



Рисунок 4. Обрабатывающие центры с ЧПУ

Сварочное оборудование «LINCOLN» помогает добиться толщины свариваемого шва до 2,5 мм. Оно представлено на рисунке 5 [1].

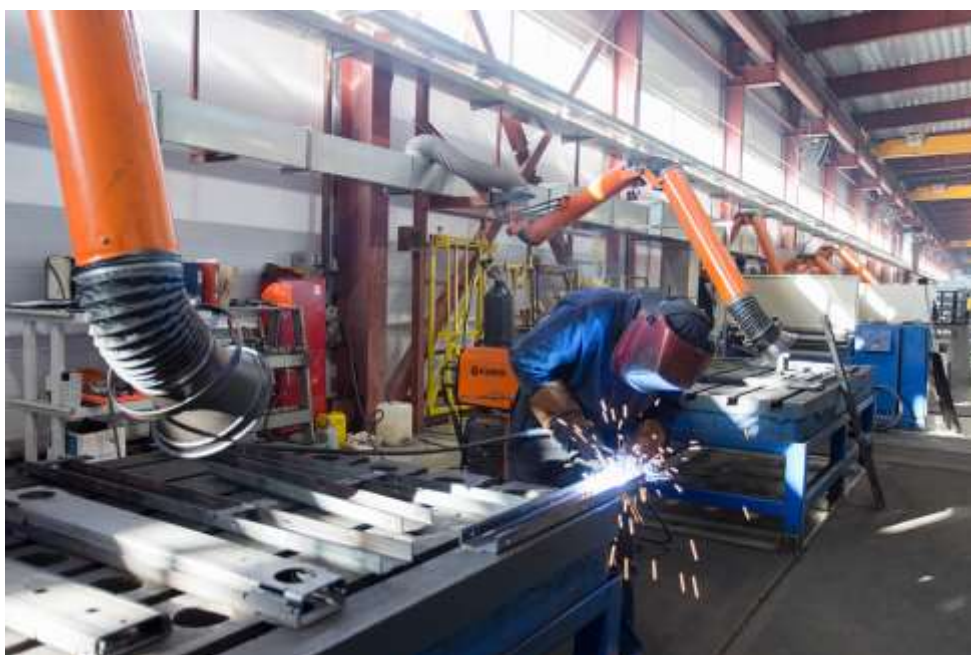


Рисунок 5. Сварочное оборудование «LINCOLN»

Рассмотрим горизонтальный фрезерный обрабатывающий центр Heskert CWK 1250. Он является еще одним примером технологического оборудования на производстве. На рисунке 6 представлено изображение обрабатывающего центра.

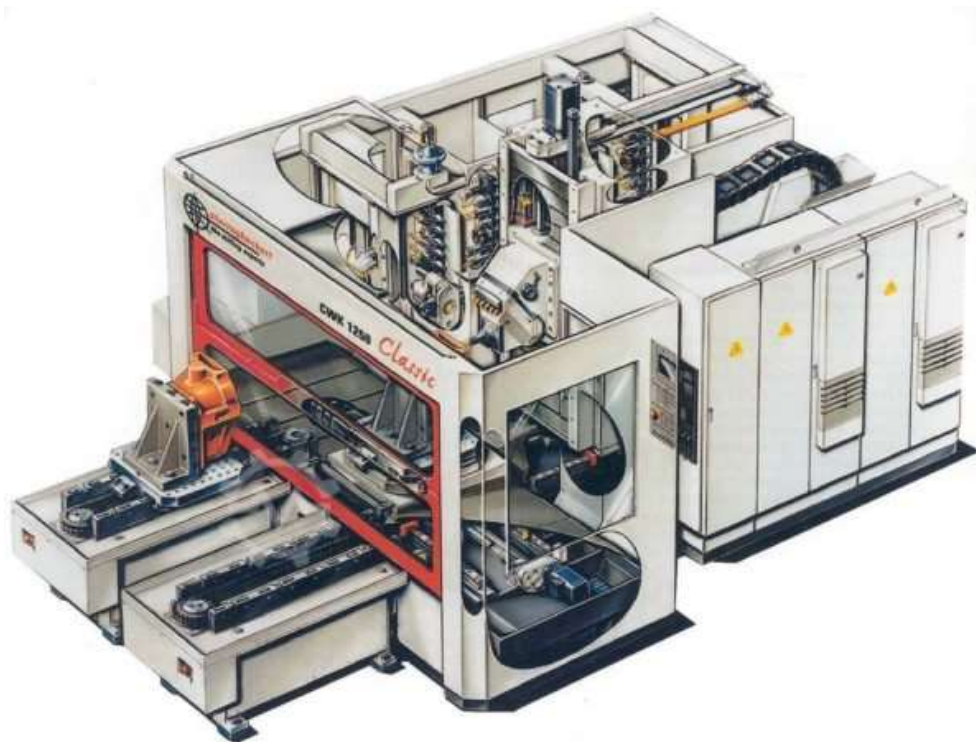


Рисунок 6. Горизонтальный фрезерный обрабатывающий центр Hecker CWK 1250

Этот фрезерный станок используется для обработки деталей с повышенной точностью. У него внутри есть патроны с битами, которыми обрабатывается заготовка. Некоторые биты из-за своей массы и габаритов не способны вмещаться в существующий магазин, поэтому эту операция выполняет человек. Она занимает много места и требует больших усилий, поскольку бита весит 40 кг.

1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма

В настоящее время в мире существует множество компаний, производящих промышленные роботы. Среди них стоит отметить ABB, FANUC, Kawasaki и KUKA. На продукции последней было решено остановиться.

Компания KUKA является одним из лидеров отрасли. Они производят роботизированные установки, с самыми различными характеристиками, для работы в сложных условиях, с различной производительностью. Ключевой особенностью для выбора робота этой фирмы стало наличие в ассортименте

модуля линейного перемещения KL 4000 (изображен на рисунке 8), который может работать совместно с роботом KR 270 R2700 ultra, который представлен на рисунке 7. Он подключается к ПЛК робота и отображается в ней как еще одна ось для перемещения. Также у компании KUKA есть программное обеспечение для симуляции различных комбинаций роботов и требуемых задач [2].



Рисунок 7. KR 270 R2700 ultra

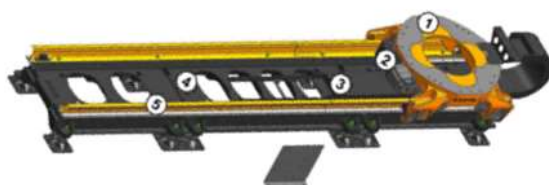


Рисунок 8. Модуль линейного перемещения KL 4000

Робот должен обладать определенными размерами и свойствами. В его задачи входит перемещение в узком пространстве между двумя рабочими столами фрезеровочного обрабатывающего центра, замена использованной биты и помощь человеку в перемещение второстепенных грузов.

Ниже представлена схема горизонтального фрезерного обрабатывающего центра Neckert CWK 1250. Также на ней обозначены места расположения робота и биты, которую необходимо заменить.

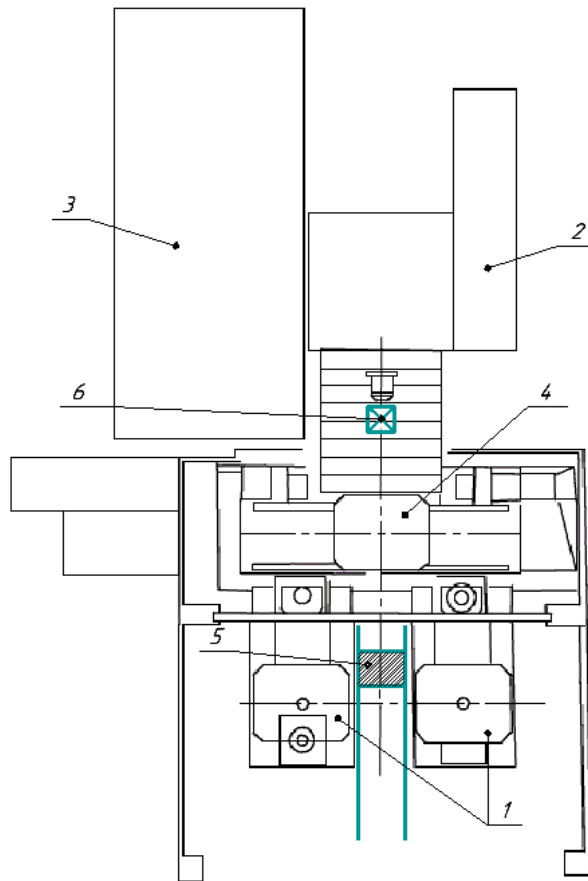


Рисунок 9. Схема станка с обозначением места для установки робота и местом замены биты, где: 1 – рабочий стол; 2 – силовой шкаф с системой управления; 3 – магазин с приспособлениями для обработки заготовок; 4 – основной рабочий стол; 5 – место расположения робота; 6 – место установки биты

На рисунке видно, что место для установки робота относительно мало, это прямоугольник со сторонами 700x1570 мм.

Робот подходит для поставленной задачи, поскольку имеет основание диаметром 650 мм. Консоль для перемещения робота может быть утоплена вглубь основания, для еще большей компактности.

Для дальнейшей работы следует выделить две системы, которые будут работать вместе

1. Система линейного перемещения робота;
2. Робот КУКА, который будет выполнять замену биты.

Система линейного перемещения - это система привода, которая в большом диапазоне регулирования скорости обеспечивает очень точные и динамичные

процессы, также обеспечивает их хорошую аналогичность. Система, предназначена для отработки скорости, момента, позиции с необходимой динамикой и точностью. Система линейного перемещения обычного вида состоит из двигателя, датчика по позиции и системы управления, имеющей три контура регулирования (по току, скорости и позиции). В отраслях машиностроения они были в большинстве случаев вспомогательными приводами (приводы подач, приводы роботов и т.п.). Однако сегодня ситуация изменилась, теперь и главные приводы разрабатываются с использованием серводвигателей.

В состав системы перемещения на основе линейного двигателя входят: двигатель, состоящий из первичной и вторичной секций; блок управления двигателем; рабочий стол; направляющие; датчик обратной связи по скорости и положению; кабелеукладочная цепь; ограничитель хода; буфер.

Для контроля скорости и перемещения системы и коммутации двигателя используется датчик линейных перемещений. Этот датчик преобразует измеряемое перемещение в последовательность электрических сигналов, содержащих информацию о величине и направлении этих перемещений.

Преобразователь состоит из измерительной линейки и головки, при этом между ними отсутствует какой-либо механический контакт. В основном используются оптоэлектрические датчики, но и могут использоваться магнитные и индукционные системы. Модель нужного блока управления определяется типом выбранного двигателя для линейного перемещения. На одной оси могут быть установлены несколько первичных секций, работающих отдельно от одного блока управления и питания. Данные секции должны быть с одинаковым типом обмотки и одного типоразмера. При этом расстояние между секциями определяется требуемыми позициями электрических фаз. Разрешенные модификации расстояний и секций между ними описываются в документах на двигатель.

KR QUANTEC ultra – самый сильный, крепкий и точный робот серии KR QUANTEC. В любом положении он обеспечивает максимальную

производительность и является таким же динамичным, компактным и эффективным, как и другие роботы этой серии. KR QUANTEC ultra также демонстрирует максимальную мощность в классе консольных роботов.

Вылеты стрелы робота и зависимость грузоподъемности от вылета представлены на рисунках 10 и 11 соответственно.

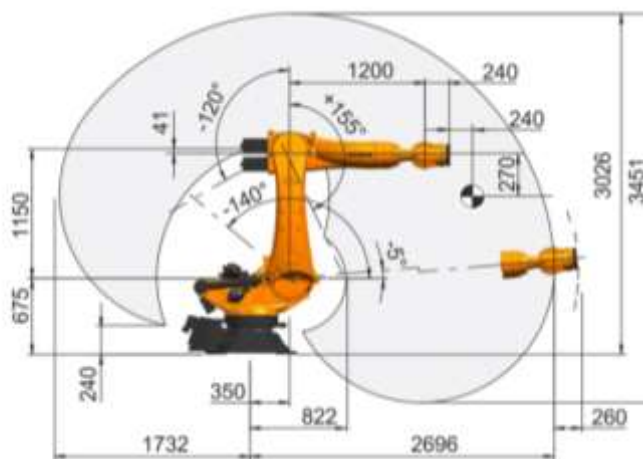


Рисунок 10. Максимальный вылет стрелы робота KR QUANTEC ultra

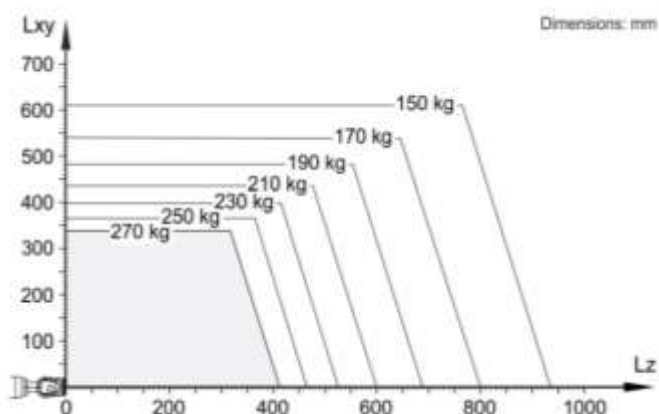


Рисунок 11. Зависимость грузоподъемности робота от вылета стрелы

Как видно из рисунков 10 и 11 данная модель робота имеет большой вылет роботизированной руки и большую грузоподъемность. Именно поэтому была выбрана данная модель, она полностью удовлетворяет условиям и задачам, которые были поставлены.



Рисунок 12. Мехатронная система, состоящая из: 1 – робот; 2 – линейный модуль; 3 – соединительные кабели и заземляющий проводник; 4 – контроллер робота; 5 – KUKA smartPAD

На рисунке 12 представлена роботизированная система в сборе со всем необходимым оборудованием для работы.

В данной работе необходимо выбрать двигатель для консоли KL 4000. Для этого необходимо произвести расчет сил сопротивления и вычислить необходимую мощность двигателя. Затем выбирается оборудование с необходимым запасом по мощности и производится предварительный расчет и построение тахограмм. В конце производится проверочный расчет двигателя.

1.3 Требования к приводам

- Точность позиционирования ± 2 мм для обеспечения нормального функционирования захвата робота;
- Статическая ошибка по скорости 5%, динамическая ошибка 5%;
- Ускорение и замедление не более $0,1 \text{ м/с}^2$.

Для определения необходимой мощности двигателя, произведены расчеты, которые приведены ниже.

1.4 Выбор системы привода

Исходными данными для расчета статического момента сил сопротивления на главном валу серводвигателя являются:

Масса тележки вместе с роботом $m_{\text{сист}} = 2500$ кг;

Масса груза $m_{\text{гр}} = 40$ кг;

Передаточное число редуктора $I_p = 12,5$.

Статический момент сопротивления вала, приведенный к двигателю, будет рассчитываться по формуле:

$$M_{\text{ст}}^{\text{дв}} = \frac{M_{\text{ст}}}{i}, \quad (1)$$

где $M_{\text{ст}}$ – статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя; i – передаточное число редуктора.

Суммарный статический момент можно рассчитать по формуле, приведенной ниже. При движении консоли вместе с роботом и грузом, систему можно считать одним телом, движущимся поступательно.

Коэффициент трения при движении консоли, полученный при сложении коэффициентов трения 8 роликовых подшипников с коротким цилиндрическим роликом [5]:

$$\mu_1 = 0,00020 \cdot 8 = 0,0016,$$

4 радиальных упорных подшипников на валах редуктора [5]:

$$\mu_2 = 0,0009 \cdot 4 = 0,0036.$$

Следовательно, коэффициент трения будет складываться из суммы двух коэффициентов трения подшипников:

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 = 0,0016 + 0,0036 = 0,0052.$$

Следовательно, суммарный статический момент будет рассчитываться по формуле:

$$M_{\text{ст}} = (m_{\text{гр}} + m_{\text{сист}}) \cdot g \cdot \mu \cdot D_{\text{ред}} \cdot 0,5, \quad (2)$$
$$M_{\text{ст}} = 2540 \cdot 9,8 \cdot 0,0052 \cdot 0,12 \cdot 0,5 = 3,883 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $m_{гр}$ – масса груза; $m_{сист}$ – масса системы консоли и робота; μ – коэффициент трения при движении консоли; $D_{ред}$ – диаметр выходной звездочки редуктора.

$$M_{ст}^{дв} = \frac{M_{ст}}{i}, \quad (3)$$

$$M_{ст}^{дв} = \frac{3,883}{12,5} = 0,31 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для предварительного выбора двигателя необходимо вычислить скорость вращения двигателя. Консоль движется поступательно со скоростью 0,25 м/с.

$$\omega_{дв} = i \cdot \frac{v_{гр}}{0,5 D_{ред}}, \quad (4)$$

$$\omega_{дв} = 12,5 \cdot \frac{0,25}{0,5 \cdot 0,12} = 52 \text{ рад/с},$$

где $v_{гр}$ – скорость консоли вместе с грузом и без; i – передаточное число редуктора; $D_{ред}$ – диаметр выходной звездочки редуктора.

Исходя из полученных данных рассчитана примерная мощность, необходимая двигателю по формуле:

$$P_{дв} = M_{ст}^{дв} \cdot \omega_{дв}, \quad (5)$$

$$P_{дв} = 6 \cdot 52 = 312 \text{ Вт},$$

где $\omega_{дв}$ – скорость вращения двигателя об/мин; $M_{ст}^{дв}$ – крутящий момент на валу.

Согласно расчетам мощность двигателя составляет $P_{дв} = 312$ Вт. При этом стоит учитывать, что эта мощность необходима двигателю для движения на постоянной скорости при поступательном движении тележки с роботом. Для разгона и торможения необходимы значительно большие значения мощности и крутящего момента. Вследствие чего двигатель выбирается с запасом.

Исходя из расчетов, предварительно выбран двигатель Siemens серии Simotics 1FK7101. Серия этих двигателей сделана специально для модуля линейного перемещения KUKA KL 4000. Она имеет определенный типоразмер, для установки в модуль линейного перемещения.

Для расчета необходимо удостовериться, что двигатель способен выдержать самый напряженный режим работы. Самым нагруженным элементом является выходной вал двигателя, так как к нему приложен самый большой момент. Необходимо провести проверку двигателя, чтобы убедиться, что он подходит для использования.

1.5 Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы

Для расчета необходимы следующие данные:

- $M_{ст}^{дв}$ – статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя;
- Момент инерции двигателя $J_{дв} = 0,00799 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- Масса робота и консоли с грузом в сборе $m = 2540 \text{ кг}$;
- Передаточное число редуктора $i = 12,5$;
- Диаметр звездочки редуктора 120 мм;
- Время цикла 13 с.

Длина модуля линейного перемещения составляет 2500мм. Для равномерного движения консоли разобьем это расстояние на 3 участка: 1 – разгон; 2 – поступательное движение; 3 – торможение.

Время разгона и торможения обусловлено допустимыми значениями ускорения системы робота и тележки для перемещения. Время цикла определяется технологическим процессом.

Для расчета разгона воспользуемся формулой для расчет ускорения а:

$$a = \frac{V_{пост} - V_0}{t} = \frac{0,25 - 0}{3} = 0,083 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad (6)$$

где $V_{пост}$ – скорость поступательного движения механизма = 0,25 м/с; t – время на разгон 3 с.

Следовательно расстояние, которое пройдет тележка во время разгона до номинальной скорости составляет:

$$S_1 = V_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} = 0 + \frac{0,83 \cdot 3^2}{2} = 0,3735 \text{ м}, \quad (7)$$

где V_0 – начальная скорость робота.

Для вычисления расстояния, пройденного при поступательном движении воспользуемся следующей формулой:

$$S_2 = V_{\text{пост}} \cdot t = 0,25 \cdot 7 = 1,753 \text{ м.} \quad (8)$$

В нашем случае тележка разгоняется и тормозит с одинаковым ускорением, следовательно для расчета третьего участка можно воспользоваться формулой, приведенной ниже:

$$S_3 = V_0 \cdot t - \frac{a \cdot t^2}{2} = 0,25 \cdot 3 - \frac{0,083 \cdot 3^2}{2} = 0,3735 \text{ м.} \quad (9)$$

Следовательно, при сложении всех трех отрезков мы получаем расстояние перемещения консоли 2,5 м.

Привод консоли работает в повторном режиме поступательного действия. Основная задача – плавное перемещение робота и груза вдоль консоли.

Разгон и торможение являются равнозамедленными движениями с одинаковым ускорением. Время разгона и торможения одинаково, для равномерной работы привода с одинаковым расстоянием на эти периоды.

Данным скоростям исполнительного механизма соответствует определенная скорость вращения двигателя. Найдем ее по формулам:

$$v_{\text{дв}} = w_{\text{дв}} \cdot 2\pi = 52 \cdot 2\pi = 326 \text{ об/мин.} \quad (10)$$

Тахограмма скорости представлены ниже на рисунке 13:

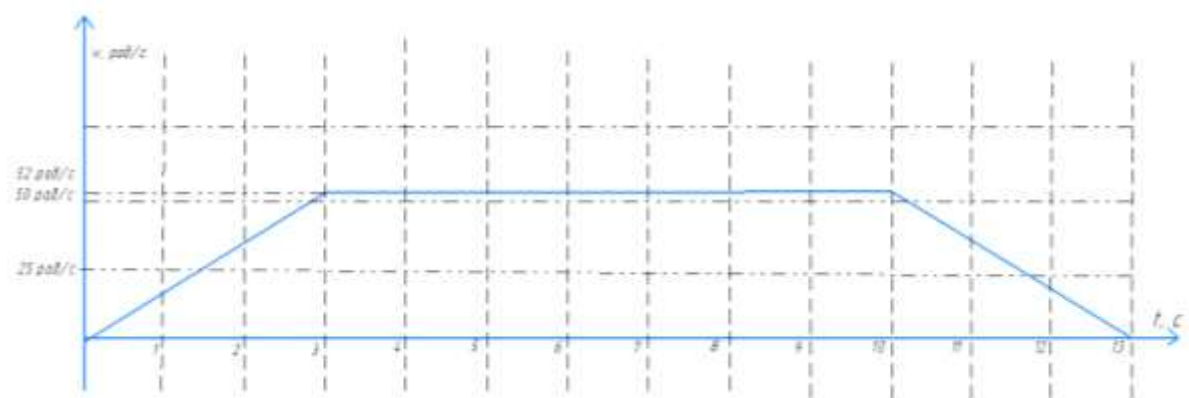


Рисунок 13. Тахограмма скорости вращения двигателя

Для расчета нагрузочной диаграммы необходимо определить суммарный момент, развиваемый двигателем вращаясь, с учетом момента динамического.

$$M_{дв} \mp M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (11)$$

где J_{Σ} – момент инерции суммарный, приведённый к валу двигателя, рассчитываемый согласно формуле (11):

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + \frac{J_{зв}}{i^2}. \quad (12)$$

Упрощенное звено представляет собой груз поступательного движения, момент инерции которого рассчитывается по формуле (11):

$$J_{зв} = m(0.5 \cdot D_{ред})^2, \quad (13)$$

$$J_{зв} = 2540(0,5 \cdot 0,06)^2 = 2,286 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Суммарный момент инерции рассчитывается по формуле:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + \frac{J_{зв}}{i^2}, \quad (14)$$

$$J_{\Sigma} = 0,079 + \frac{2,286}{12,5^2} = 0,093 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Динамическое ускорение может быть вычислено по формуле:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{w_{кон}}{\Delta t} = \frac{52}{3} = 17,33 \text{ с}^{-2}. \quad (15)$$

Динамический момент двигателя можно найти по формуле (16):

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (16)$$

$$M_{дин} = 17,33 \cdot 0,093 = 1,612 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Нагрузочная диаграмма и тахограмма работы главного привода приведена на рисунке 14. На ней с момента времени 1с до момента времени 3 с происходит разгон системы робота и модуля линейного перемещения до номинальной скорости движения. Этот участок сопровождается большим динамическим моментом. Далее с 3 по 10 с идет поступательное движение системы, которое происходит со статическим моментом. С 10 с по 13 с происходит равномерное торможение всей системы, что также вызывает большой изменение динамического момента.

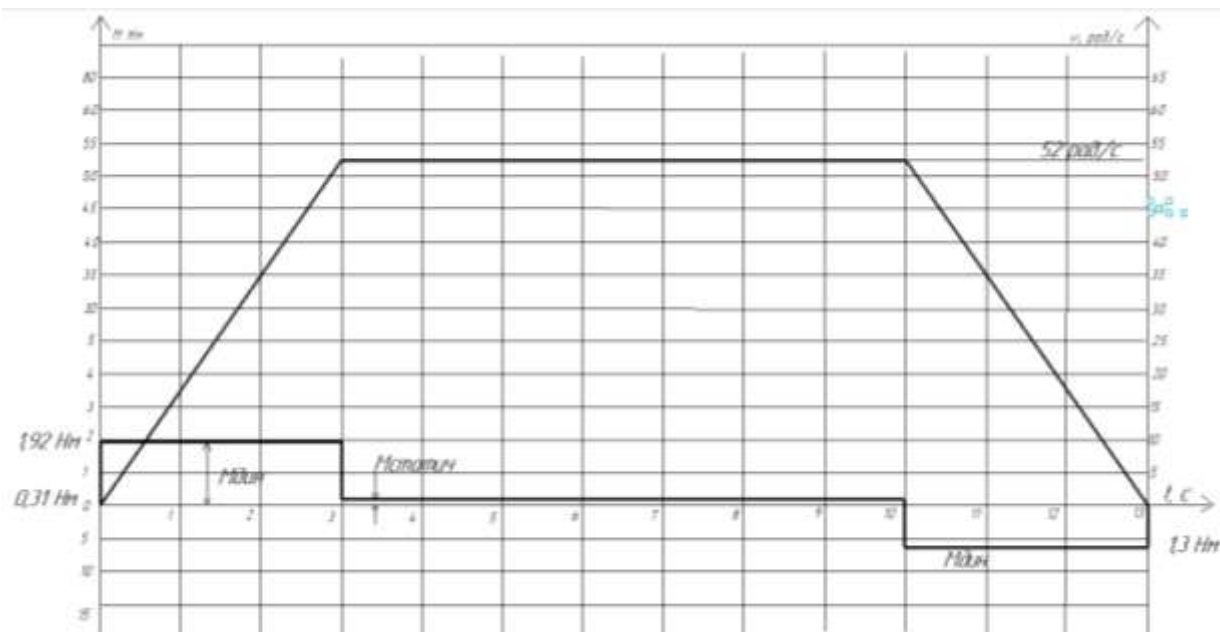


Рисунок 14. Нагрузочная диаграмма и тахограмма работы привода главного вала

Чтобы подтвердить, что двигатель полностью выполняет все поставленные задачи, необходимо выполнить проверочный расчет. Ниже, в таблице 1 приведены основные параметры двигателя Simotics 1FK7101.

Необходимо выполнить проверочный расчёт и убедиться, что двигатель подходит по мощности и нагреву.

Для расчета привода используют метод эквивалентного момента. Практически для выбора мощности двигателя приходится пользоваться нагрузочной диаграммой момента на валу.

Таблица 1. Технические характеристики Simotics 1FK7101

Параметр	Значение
Мощность, кВт	0,59
Частота, Гц	50
Номинальный ток, А	18
Номинальное напряжение, В	90
n , об/мин	1000
Момент инерции, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,00799
Оптимальный момент на валу Нм	3

$M_э$ – эквивалентный момент, который рассчитывается по формуле (17):

$$M_э = \sqrt{\frac{\sum M_k^2 \cdot \Delta t_{ki}}{\sum_k \Delta t_k}}, \quad (17)$$

где $\sum_k \Delta t_k$ является временем цикла и составляет 13 секунды.

Время цикла это движение модуля линейного перемещения от начала до конца координат. Время перемещения составляет 13 с.

Согласно формуле 12:

$$M_э = \sqrt{\frac{1,92^2 \cdot 3 + 0,31^2 \cdot 7 + 1,3^2 \cdot 3}{13}} = 1,13 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_э < 0,8 M_{\text{опт}},$$

$$1,13 < 2,4.$$

Данное условие выполняется, то есть данный двигатель подходит для данной задачи[4].

1.6 Выбор основного силового оборудования

Для корректной работы двигателя был подобран преобразователь этой серии номиналом 36А, с перегрузочной способностью до 48А. Такая характеристика была выбрана с целью защиты привода. Изображение частотного преобразователя представлено на рисунке 15.



Рисунок 15. Частотный преобразователь серии SINAMICS G120

В таблице 2 представлены характеристики частотного преобразователя.

Частотный преобразователь подбирается в зависимости от мощности двигателя. Данный преобразователь взят по номиналу, с перегрузочной способностью до 2 раз [3].

$$I_{н.п.} = I_{н.дв.} \cdot \frac{\lambda_{дв}}{\lambda_{пр}} = 18 \cdot \frac{2,5}{2} = 22,5 \text{ А.} \quad (18)$$

Таблица 2. Характеристики частотного преобразователя

Мощность	2 кВт
Номинальный ток преобразователя	22 А
Максимальный ток	45А
Питающая сеть	3 АС 380 В ... 480 В, ± 10 %

Подобранный частотный преобразователь обеспечивает следующие характеристики:

1. Пусковой ток ограничивается, при долгой работе, во время остановки и во время короткого замыкания;
2. Защищает от высокого напряжения и низкого;
3. Осуществляется контроль за температурой двигателя;
4. Защиту радиатора от высокой температуры и перегрева;
5. Защиту транзисторов выходных.

Контактор – двухпозиционный электромагнитный аппарат, предназначенный для частых дистанционных включений и выключений силовых электрических цепей. Он предназначен для пуска двигателя от сигнала управляющей цепи и подбирается по номинальному току.

$$I_{\text{макс}} = I_{н.дв.} \cdot \lambda_{дв} = 18 \cdot 2,5 = 45 \text{ А.} \quad (19)$$

Технические характеристики приведены ниже в таблице 4.

Контактор устанавливается в соответствующее место в щите управления двигателем. Контактор является необходимым, поскольку с помощью автоматического выключателя не осуществляется включение и отключение двигателя от питающей сети.

Таблица 3. Технические характеристики контактора Schneider Electric

Номинальный ток	45 А
Количество силовых полюсов	4
Количество НО/НЗ контактов	1/1
Напряжение питания катушки управления	24 В

Сетевой дроссель, который также называют входным реактором, подключается на входе питания частотного преобразователя. Основными характеристиками дросселя являются индуктивность и максимальный длительный ток.

Индуктивность выбирается такой, чтобы при рабочей частоте и номинальном рабочем токе падение напряжения на дросселе составляло 3-5%, примем 20В.

Рассчитать падение можно по формуле:

$$U = 2\pi fLI = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 18 \cdot L < 20 \text{ В}, \quad (20)$$

$$L < 0,3 \text{ мН.}$$

Исходя из полученных данных был выбран дроссель ED3N - 0,29/50

Основные характеристики:

- Мощность 18 кВт;
- Ток 50 А;
- Индуктивность 0,29 мГн;
- Напряжение 380 В.

1.7 Защита привода, расчет уставок защитных устройств

Для управления, питания и защиты мехатронной системы на основе продукции компании KUKA используется промышленный контроллер KUKA KR C4. Контроллер способен собирать информацию о состоянии питающей сети, минимизировать помехи передачи данных, защищать все электронные элементы

от некачественного сигнала входной питающей сети. На рисунке 16 представлен робот с контроллером.



Рисунок 16. Мехатронная система, состоящая из: 1 – манипулятор; 2 – контроллер робота; 3 – планшет; 4 – соединительные кабели

Внутри промышленного контроллера установлены различные устройства, позволяющие осуществлять защиту привода и управление. Данная система (которая изображена на рисунке 17) состоит из различных блоков, которые взаимодействуют между собой: 1 - сетевой фильтр, 2 - главный выключатель, 3 - CSP (Политика защиты контента (CSP) - это дополнительный уровень безопасности, который помогает обнаружить и смягчить некоторые виды атак, в том числе межсайтовый скриптинг (XSS) и инъекцию данных. Эти атаки используются для всего, от кражи данных до порчи сайтов и распространения вредоносного ПО.), 4 - Программируемый контроллер, 5 - Источник питания привода, 6 - Контроллер привода, 7 - Опциональный контроллер привода, 8 - Тормозной фильтр, 9 - ССУ, 10- Расширенный CSP, 11 - Предохранитель, 12 - Батарея , 13 - Панель подключения, 14 - KUKA SmartPad [2].

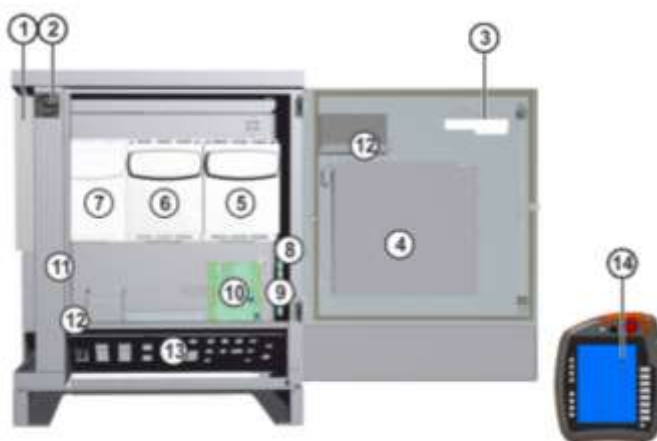


Рисунок 17. Внутреннее устройство KUKA KR C4

На задней стороне (которая изображена на рисунке 18) промышленного контроллера расположены: 1 - Радиаторы, 2 - Тормозной резистор, 3 - Теплообменник, 4 - Внешний вентилятор, 5 - Низковольтный блок питания.

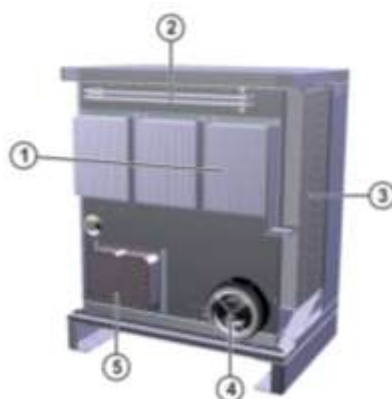


Рисунок 18. Задняя часть модуля KUKA KR C4

Блок питания KUKA (KPP) является источником питания привода и генерирует выпрямленное напряжение промежуточной цепи от источника переменного тока. Это промежуточное напряжение цепи используется для питания внутренних контроллеров привода и внешних дисков.

Чтобы избежать непредвиденных поломок, ремонта и дорогостоящих потерь из-за простоя двигателя, необходимо оборудовать двигатель защитным оборудованием.

Внешняя защита от тока КЗ установки. Устройства защиты, как правило, являются предохранителями различных видов или реле защиты от токов короткого замыкания. Защитные устройства данного типа обязательны и официально подтверждены, они устанавливаются в соответствии с нормами безопасности.

Внешняя защита от перегрузок, это защита по току т.е. защита от перегрузок двигателя, а, следовательно, предотвращение различных повреждений и сбоев в работе электродвигателя.

Встроенная защита двигателя от перегрева, чтобы избежать разрушений и сбоев в работе электродвигателя. Для встроенного устройства защиты всегда требуется внешний переключатель, а для некоторых стандартов защиты двигателя требуется реле перегрузки.

Для защиты сети от перегрузок и КЗ при возникновении каких-либо из перечисленных выше мест отказа необходимо определить, какой механизм защиты будет использоваться. Он должен автоматически отключать питание от сети. Плавкий предохранитель является самым простым устройством, выполняющим несколько функций. В основном, плавкие предохранители соединяются между собой с помощью аварийного выключателя, который может отключить двигатель от сети. Недостатком такого вида защиты является то, что при одиночном срабатывании плавкого предохранителя его придется менять, что может занять достаточно долгое время. Следовательно, данный тип защиты редко используется.

Автоматический выключатель токовый является устройством защиты от перегрузок по току. Он размыкает автоматически и замыкает цепь при заданном значении перегрузки тока. Если токовый выключатель работает в диапазоне своих рабочих параметров, размыкание и замыкание никак не влияет на его работу. Сразу же после возникновения перегрузки и отключения можно легко восстановить работу автоматического выключателя - он устанавливается в исходное положение.

Различают два вида автоматических выключателей: магнитные и тепловые.

Тепловые автоматические выключатели - это самый экономичный и надёжный тип защитных устройств, которые подходят для электродвигателей. Они могут выдержать огромные амплитуды тока, которые возникают при пуске двигателя, и защищают электродвигатель от различных сбоев, таких как блокирование ротора.

Магнитные автоматические выключатели являются надёжными, точными и экономичными. Магнитный автоматический выключатель готов к изменениям температуры, т.е. изменения температуры окружающей среды не влияют на его диапазон срабатывания. По сравнению с тепловыми автоматическими выключателями, магнитные автоматические выключатели имеют точное и определённое время срабатывания.

Реле перегрузки является еще одним средством защиты двигателя и применяется в следующих случаях:

- Размыкают цепь двигателя, если ток превышает предельно допустимое значение и возникает большая угроза повреждения электродвигателя;
- При пуске двигателя позволяют выдерживать большие временные перегрузки без разрыва цепи.

Устанавливаются в исходное положение автоматически или вручную после устранения перегрузки.

IEC и NEMA стандартизируют классы работы реле перегрузки. В основном, реле перегрузки отреагируют на условия перегрузки в соответствии с характеристикой срабатывания. Для стандарта (NEMA или IEC) деление всех изделий на классы определяет, какой период времени требуется реле на размыкание при перегрузке. Наиболее часто встречающиеся классы: 10, 20 и 30. Цифровое обозначение в нем отражает время, необходимое реле для срабатывания. Реле перегрузки класса 10 срабатывает через 10 секунд и менее при 600% тока полной нагрузки, реле класса 20 срабатывает через 20 секунд и менее, а реле класса 30 - через 30 секунд и менее.

Новые наружные системы защиты электродвигателя также обеспечивают защиту от перенапряжения, перекоса фаз, и ограничивают число включений/выключений, и устраняют вибрации. Кроме того, они позволяют контролировать температуру подшипников и статора через датчик температуры (PT100), измерять сопротивление изоляции и регистрировать температуру окружающей его среды. В дополнение к этому модернизированные наружные системы защиты двигателя могут принимать и обрабатывать сигнал от встроенной защиты по теплу.

Наружные реле безопасности двигателя предназначены для защиты трёхфазных двигателей при угрозе повреждения двигателя за короткий или за длительный период работы. Кроме защиты двигателя, наружное реле защиты имеет ряд особенностей, которые обеспечивают безопасность электродвигателя в различных ситуациях:

- Диагностирует появившиеся неисправности;
- Подаёт сигнал, когда возникает новая неисправность в результате основного процесса;
- Позволяет выполнять проверку работоспособности реле во время технического обслуживания.

Можно подключить реле перегрузки к центральной системе управления цехом для постоянного контроля и быстрой диагностики неисправностей. Если в реле перегрузки установлено наружное реле защиты, сокращается период вынужденного простоя из-за остановки технологического процесса в результате поломки. Это достигается благодаря очень быстрому обнаружению неисправности и недопущению повреждений двигателя.

Например, двигатель может быть защищён от: блокировки и перегрузки ротора, замыкания на массу, заклинивания, частых пусков, разомкнутой фазы, перегрева (с помощью сигнала, поступающего от электродвигателя через РТ100 или терморезисторы), малого тока, предупреждающего сигнала о перегрузке.

Для защиты привода подходят автоматические выключатели электромагнитного действия, так как питание осуществляется от существующей трехфазной сети в закрытом помещении. Сеть предприятия подготовлена для использования потребителями, следовательно дополнительных защит не требуется.

Ниже на рисунке 19 представлена схема питания двигателя.

Для того, чтобы подобрать автомат по току короткого замыкания, следует учитывать несколько факторов и руководствоваться правилами по построению электрических сетей. Также номиналы автоматов могут быть самыми разными и прописаны в техническом задании. Автоматический выключатель на входе защитит систему от токов короткого замыкания в сети, или системе двигателя и преобразователя частоты.

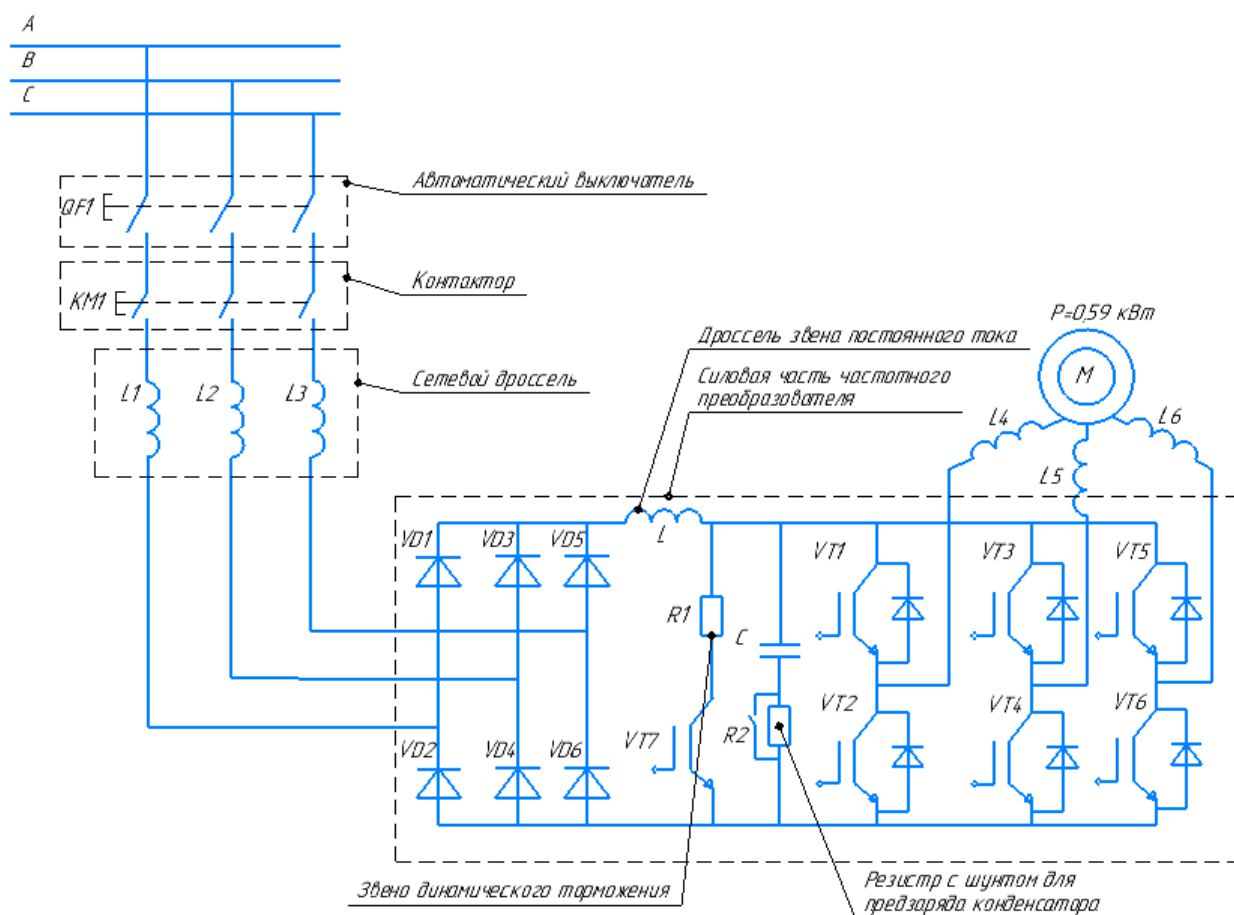


Рисунок 19. Силовая схема питания двигателя

Рабочий ток – характеристика, которая отображает значение тока выше номинального значения, при котором произойдет отключение. Также работает защита от перегрузок. Для того, чтобы подобрать подходящее значение 10, 16, 20, А нужно основываться на сечению кабеля и значение мощности потребителя.

Номинальный ток срабатывания, он подбирается вместе с током автомата. Его необходимо подобрать по номинальному значению. Также при включении двигателя ток может быть значительно больше номинального, что таже необходимо учитывать. Для этого стоит подобрать правильный класс срабатывания аппарата. От этого зависит срок службы всей системы и ее компонентов.

Ток уставки автоматического выключателя рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{выкл}} = I_{\text{ном}} \cdot 1,5 = 18 \cdot 1,5 = 27 \text{ А}, \quad (21)$$

где $I_{\text{выкл}}$ - ток срабатывания выключателя; $I_{\text{ном}}$ - номинальный ток потребителя выключателя.

Полученное значение округляется в меньшую сторону и принимается равным 25 А.

По полученным данным был выбран автоматический выключатель производства Schneider Electric, внешний вид которого представлен. Данные о технических характеристиках приведены в таблице 4.

Таблица 4. Технические характеристики автоматического выключателя

Ток короткого замыкания	6000 А
Номинальный ток	25 А
Характеристика электромагнитного расцепителя	C

Модуль линейного перемещения оснащается двигателем, который необходимо подобрать по характеристикам системы. Для этого был рассчитан статический момент системы робота и консоли и посчитана предварительная мощность двигателя.

Был предварительно выбран двигатель фирмы Siemens. На основе его характеристик и данных о движении системы робота и модуля линейного перемещения были построены график изменения угловой скорости двигателя и тахограмма работы привода главного вала.

На основании полученных данных был окончательно выбран двигатель Siemens Simotics 1FK710. Для него был произведен проверочный расчет по методу эквивалентного момента для проверки двигателя от перегрева.

Для регулирования скорости вращения двигателя был подобран частотный преобразователь Siemens серии SINAMICS G120. Для защиты системы от токов короткого замыкания подобран трехфазный автоматический выключатель фирмы Schneider Electric. Также для удобства пуска двигателя подобран контактор.

2 РАЗРАБОТКА САУ

2.1 Разработка архитектуры систем автоматизации

Для осуществления взаимодействия работы мехатронной системы замены биты на основе робота Kuka и консоли для ее перемещения и горизонтального фрезерного обрабатывающего центра Heckert CWK 1250 необходимо объединить их в общую систему автоматизации. Данный фрезерный станок работает на системе управления SINUMERIK 840D.

SINUMERIK 840D — новая полностью цифровая система для различных типов применений. Вместе с цифровым декодером SIMODRIVE 611D и контроллером SIMATIC S7-300 SINUMERIK 840D разработал абсолютно новую компьютерную систему, которая подходит для различных сложных задач обработки, в которой показывает свою скорость и динамичность.

В всем мире SINUMERIK 840D используется для сверления, лазерной резки, шлифования, изготовления инструмента, резки, перфорирования, раскройки материалов, транспорта и других сложных задач.

SINUMERIK 840D в системе NCU (Numeric Control Unit — устройство числового управления) объединяет различные задачи ПЛК и ЧПУ, коммуникации. Установленный в каркас-носитель, NCU встраивается сразу в цифровую систему управления SIMODRIVE 611D, он определен слева, рядом с модулем питания и рекуперации [3].

Способы работы данных процессоров NCU и программа создает возможность к очень гибкой работе станка в задачах обработки. Этот способ модульности помогает оборудовать огромное количество различных станков.

Для решения поставленной задачи существует решение компании Kuka - KUKA.CNC Sinumerik [2].

С помощью программного обеспечения KUKA.CNC Sinumerik и интерфейса Profinet, синхронизированного между системами управления KR C4 и Siemens

Sinumerik 840D sl, можно управлять любым роботом KUKA посредством системы ЧПУ Sinumerik [2].

Система Sinumerik 840D sl при этом выполняет задачи по планированию траектории движений робота и предлагает привычным к ЧПУ Sinumerik пользователям все знакомые функции ЧПУ Sinumerik для управления роботом KUKA, например программирование G-кода и циклические программы.

Система KUKA будет по-прежнему выполнять все функции по управлению и приводу, связанные с максимально точным движением промышленного робота по запрограммированной траектории. Интерпретатор траектории движения робота использует при этом динамическую модель, которая обеспечивает наилучшее перемещение робота с учетом его текущего положения. Алгоритмы траекторий движений и безопасности KUKA обеспечивают надежную эксплуатацию робота даже в связке с ЧПУ Siemens 840D sl.

Для корректирования положения руки робота относительно заменяемой биты и минимизации ошибки позиционирования используется стерео сенсор KUKA _3D Perception [2]. Он распознает неструктурированное изображение в режиме реального времени и точно размещает объекты с разной кинематикой в пространстве. В результате этого прогрессивного решения: робот может определять свое положение в пространстве с точностью до миллиметра и решать задачи еще лучше и эффективнее.

Для реальных применений система технического зрения (доступны два варианта стереобазы – 65 мм, примерно как человеческое зрение, и 130 мм) крепится, например, на конце промышленного манипулятора. Сообщая ему – с точностью до миллиметра – данные о положении и пространственной ориентации каждого из объектов произвольной формы. Это позволяет, например, роботу KUKA брать вакуумным манипулятором детали на производстве или упаковки на складе, и помещать их хоть на автоматическую линию для обработки, хоть в поддоны для транспортировки потребителю.

Ниже на рисунке 20 представлена структурная схема автоматизации.

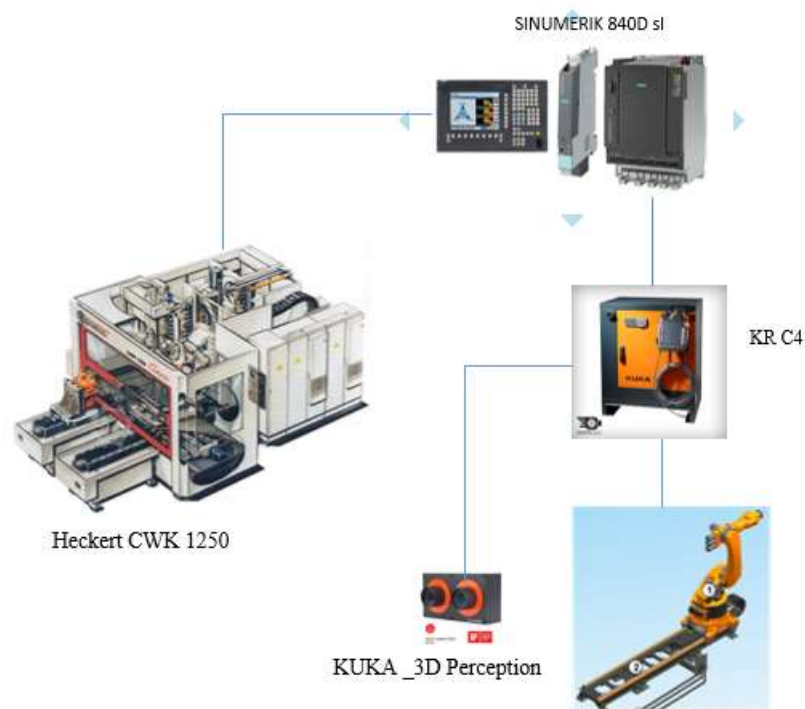


Рисунок 20. Структурная схема системы автоматизации

Данная система является объектом повышенной опасности для человека. Зона действия робота должна быть четко обозначена и огорожена. Проникновение человека в данные зоны при работе установки не допускается. Система должна отключаться или переводиться в безопасный режим работы.

Для предотвращения попадания человека в опасную зону движения робота предлагаются решения:

- С помощью механических заграждений предотвратить попадание человека или его рук в опасные зоны;
- Когда человек пересек опасную зону, устройство безопасности (световые барьеры, коврики безопасности) автоматически выключают машины и механизмы;
- Разрешить попадание людей или их рук, когда система находится в безопасном состоянии.

Режимы работы типа наладка, программирование должны сопровождаться движениями, оценить которые можно непосредственно на рабочей площадке.

Безопасность заключается в том, чтобы ни одно движение не создало опасность для человека.

Требования к движениям:

- Только установившегося типа и скорости;
- Строго по команде;
- Только при гарантии, что ни одна часть тела не находится в опасной зоне;
- Ошибочные действия оператора не должны приводить к аварийному

режиму работы.

Система контроля безопасности должна гарантировать, что нужная функция безопасности выполняется при любых нарушениях. Ошибка в системе контроля не должна приводить к опасному состоянию и определяться как можно быстрее.

Также необходимо предусмотреть специальные устройства остановки (демпфирования в условиях изменения нагружения). В систему управления можно встраивать разные диагностирующие средства и алгоритмы. Для обеспечения безопасности необходимо использовать средства механической защиты такие как ограждений рабочей зоны и использования различных датчиков. Электрические кабели должны иметь защиту и быть устойчивыми к внешнему воздействию. Также нужно проводить анализ работы системы с целью выявления скрытой опасности, которая может возникнуть при работе автоматической линии.

2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат

Система управления роботом KR C4 осуществляет расчет, питание и управление роботом и консоли для его перемещения. Исходя из данных технологического процесса была выбрана модель системы управления с характеристиками, которые приведены в таблице 5.

Таблица 5. Технические данные KR C4

Размеры (ВхШхГ)	270 x 485 x 462 мм
Вычислительное устр-во	Мног. яд.
Память	SSD
Интерфейс	USB3.1, Gbe, DVI-I
Количество осей (макс.)	6+2 (с доп. коробкой)
Частота сети	50/60 Гц ± 3 Гц
Номинальное напряжение сети питания	АС 210 В до 230 В
Класс защищенности	IP25

Система управления фрезерным обрабатывающим центром построена на базе компонентов компании Siemens. Ниже в таблице 6 описаны характеристики внешней системы управления Siemens SINUMERIK 840D sl [3].

Таблица 6. Характеристики внешней системы управления Siemens SINUMERIK 840D sl

Название и серийный номер	SINUMERIK 840D sl NCU 720.3 PN mit PLC 317-3 DP/PN
Память	1 Gbyte DRAM 1 Mbyte NVSRAM
Контроллер	PLC 317-3 DP/PN
Питание	24В
Размеры	50x418x272 мм

Для осуществления машинного зрения применяется интеграция в систему решения компании KUKA стерео сенсор KUKA _3D Perception. Он обеспечивает наиболее точное позиционирование робота относительно заменяемой биты фрезерного станка. Ниже в таблице 7 представлены характеристики данного сенсора [2].

Встроенная графическая карта помогает обрабатывать изображения глубины непосредственно в самом сенсоре. Внешних расчетов не требуется, что идеально подходит для мобильных робототехнических систем. Производительное

аппаратное обеспечение разработано для работы в роботизированной среде, рассчитано на температуру до 50 °С и соответствует классу защиты IP 54 хорошее условие для параллельных кинематических механизмов.

Таблица 7. Характеристики сенсора KUKA _3D Perception

Фокусное расстояние	65 mm
Диапазон измерения глубины	0,2 m ... 1,0 m
Разрешение изображения	1280 x 960 Pixel
Поле зрения	По горизонтали: 61 ° По вертикали: 48
Разрешение	Высокое: 640 x 480 пикселей при 3 Гц Среднее: 320 x 240 пикселей при 15 Гц Низкое: 214 x 160 пикселей при 25 Гц
Собственное движение (ИДУ)	200 Гц, низкая задержка
Процессор	Nvidea tegra K1

Для точного управления приводом необходимо определять положения вала двигателя в данный момент времени – обратная связь по скорости. Для этого необходимо поставить на вал двигателя абсолютный энкодер.

Датчик положения вала двигателя должен подключаться к системе управления двигателя по сети ProfiBus.

Открытая сеть промышленного типа, которая стала разработкой компании Сименс для своих промышленных контроллеров Симатик. В результате данной разработки организация ProfiBus разработала разные международные протоколы, которые потом были приняты различными комитетами по стандартизации национального оборудования. Хорошо прижилась в Европе, особенно в отрасли машиностроения и управлении различным промышленным оборудованием. Сеть ProfiBus – это совокупное понятие, она основывается на нескольких общих стандартах и протоколах.

ProfiBus может объединять различные технологические и функциональные особенности для последовательной связи уровня. Данная система может

соединить разные устройства автоматического управления в единую систему на низком уровне датчиков.

Ниже в таблице 8 представлены характеристики выбранного датчика абсолютных значений Siemens 6FX2001-5FN13 [3].

Таблица 8. Характеристика датчика абсолютных значений Siemens 6FX2001-5FN13

Рабочее напряжение U_p	= 10 ... 30 В
Интерфейс	PROFINET / EtherNet/IP IO с RT / IRT PROFINET / EtherNet/IP IO with RT / IRT
Тактовый вход	2 порта IRT
Вывод данных	2 порта IRT
Скорость передачи	100 Мбит/с
Тип подключения	2 х штекер M12, 4-полюсный для портов PROFINET / EtherNet/IP, 1 х штекер M12, 4-полюсный для рабочего напряжения радиальная
Разрешение	13 bit (8192 шага)
Телеграмма	Из профиля преобразователя PNO V4.1 класс 1, класс 2, класс 3, класс 4, стандартные. телегр. 81/82/83/84, телегр. Siemens 860

2.3 Выбор и разработка функциональной системы САР привода проектируемого агрегата

В проектируемой системе замены биты установлено 7 приводов, 6 из которых приводят в действие робота KUKA, седьмой приводит в движение консоль для перемещение KL 4000.

Для разработки функциональной системы САР за основу возьмем привод консоли для перемещения.

В его основе лежит синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Ниже, в таблице 9 приведены основные параметры двигателя Simotics 1FK7101 [3].

Компактные синхронные электродвигатели с возбуждением постоянными магнитами для стандартных сервоприложений. Доступны в версиях Compact, High Dynamic и High Inertia. Само охлаждаемые двигатели характеризуются увеличенной перегрузочной способностью и компактностью. Подвижный отвод кабеля и заранее собранные кабели гарантирует гибкую, быструю и безопасную связь с преобразователем.

Таблица 9. Технические характеристики двигателя Simotics 1FK7101

Параметр	Значение
Мощность, кВт	1,5
Частота, Гц	50
Значение тока, А	18
Номинальное напряжение, В	90
n, об/мин	2000
Момент инерции, кг·м ²	0,00799
Оптимальный момент на валу Нм	73

Двигатель подключается к системе управления роботом по сети ProfiBus и получает обратную связь по положению от датчика абсолютных перемещений, установленном на валу двигателя.

Преимущества 1FT7:

- Хорошая динамика в большом диапазоне скоростей благодаря очень высокой допустимой перегрузке 4M0 при самостоятельном охлаждении;
- Высокий уровень защиты обеспечивает возможность работы и в тяжелых условиях внешней среды;
- Большая прочность при вибрационной и ударной нагрузке благодаря специальному датчику;
- Быстрый и простой монтаж из-за поперечного профиля и поворотного штекера с быстродействующим соединением;

- Высокий коэффициент полезного использования;
- Двигатели синхронные 1FT7 Comtract из-за малой пульсации момента хорошо подходят для станков с высокими требованиями к уровню гладкости поверхностей и нормальной обработки. Также хорошим преимуществом данных двигателей является их малогабаритная конструкции;
- Двигатели имеют достаточно малое значение инерции ротора, что помогает добиться очень хорошей динамики и максимально сократить такт. Двигатели Siemens Simotics поставляются с обязательной вентиляцией и водным охлаждением, что осуществляет длительную работу с очень высокой мощностью.

Ниже, на рисунке 2 представлена функциональная схема САР привода консоли для перемещения робота KUKA.

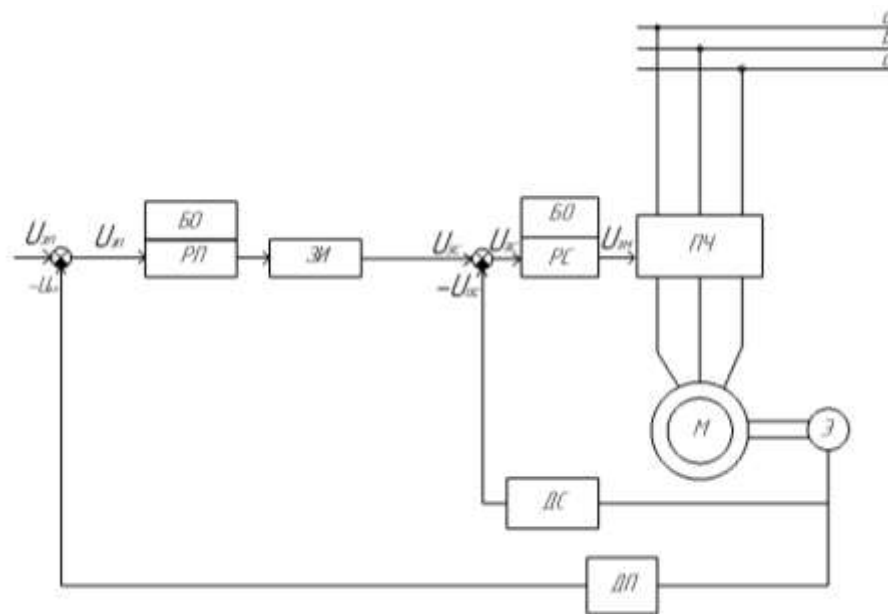


Рисунок 21. Функциональная схема САР привода консоли для перемещения робота KUKA

ЗИ – Задатчик интенсивности это устройство нового типа, которое встраивается в цепь задания регулируемых величин и ограничивает скорость (быстроту) изменения во времени задания положения на САР; ограничивает темп нарастания скорости приводного вала двигателя консоли для перемещения;

РП – Регулятор положения, осуществляет изменение коэффициентов усиления в зависимости от входного напряжения;

БП – Блок переключения, осуществляет переключение между сигналами;

БО – Блок ограничений, осуществляет ограничение заданного максимального значения; БО после регулятора положения ограничивает сигнал задания на скорости; БО после регулятора скорости ограничивает момент;

ПЧ – Преобразователь частоты;

М – Двигатель;

Э – Энкодер;

ДС – Сигнал значения скорости, сравнивается с сигналом задания на скорость и вычисляется ошибка регулирования по скорости;

ДП – Сигнал значения положения, сравнивается с сигналом задания на положения.

2.4 Разработка контура регулирования технологических координат

Самое важное требование к регулированию координат – ограничение максимальной величины сигнала, а иногда и его производных. Основные требования к выходной координате – маленькие ошибки в статическом и динамическом режимах работы системы. Минимальное время. Поэтому, главной в САР является координата на выходе системы, а остальные остаются подчиненными. Регулирование этих координат может производиться, только исходя из лучшего значения выходного значения координаты.

На практике специалисты при задаче одновременного регулирования множества координат используют, в основном, многоконтурные САР с последовательным регулированием подчиненных координат. Подчиненное последовательное регулирование помогает обеспечить:

- Практически любые необходимые передаточные функции регуляторов положения и скорости на операционных усилителях;
- Маленькую входную мощность управления;
- Много профильность при самых различных технологических требованиях.

Поэтому, достоинства подчиненного регулирования координат заключаются:

- Сложная внутренняя последовательность логики последовательного решения трудной технологической задачи по частям;
- Реализация увеличения объема системы и обеспечение необходимого количества контролируемых координат объекта;
- Стандартизация методов счета, технических средств организации управления и построения алгоритмов алгоритмов;
- Стандартизация различных показателей качества процессов регулирования и ограничения координат;
- Удобство проектирования, комплектации, и наладки, и эксплуатации САР.

Стоит сказать, что структуры с параллельным включением регуляторов тоже годятся к применению в настоящее время, особенно в микропроцессорных системах управления.

Технологический процесс регулируемого агрегата требует регулирование скорости и положения. В соответствии с этим будет 2 контура регулирования: внутренний контур скорости и внешний контур положения. Оптимизированный контур момента (ОКМ) будет представлен в виде апериодического звена в составе контура скорости. Для реализации такой двухконтурной системы необходимо 2 регулятора:

- П-регулятор скорости, т.к. измерительный модуль должен проводить проверку на определенной скорости, статических ошибок не допускается. Принцип действия основывается на том, чтобы регулятор вырабатывал управляющее воздействие на объект регулирования пропорционально величине ошибки (т. е. чем больше ошибка E , тем больше управляющее воздействие Y);

- Нелинейный регулятор положения, для корректной отработки малых, средних и больших перемещений.

В момент старта система осуществляет равномерный разгон до номинальной скорости движения консоли с роботом. Система сразу определяет положение, контур положения осуществляет корректировку, осуществляется перемещение системы на заданное расстояние. При достижении заданной координаты,

регулятор положения передает сигнал регулятору скорости, происходит плавное снижение скорости системы. Необходимо реализовать переключение между управлением по скорости и положению [6].

2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода

В первую очередь разрабатывается контур регулирования внутренней координаты. Затем идет в разработку следующие. Контур разрабатывается отдельно. Стандартные методики синтеза и настройки уменьшают быстродействие, в среднем, в два раза. Но есть способ этого избежать и увеличить быстродействие.

ОКМ можно представить в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией:

$$W_{\text{окм}} = \frac{1/k_{\text{ом}}}{2T_{\mu}p + 1}, \quad (1)$$

где $T_{\mu} = 0,005$ с – постоянная времени ПЧ; $k_{\text{ом}}$ – коэффициент обратной связи по моменту.

Коэффициент $k_{\text{ом}}$ находится по следующей формуле:

$$k_{\text{ом}} = \frac{U_{\text{зм}}}{M_{\text{м}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{зм}} = 10$ В – максимальный сигнал задания; $M_{\text{м}} = 73$ Нм – максимальный момент двигателя.

По формулам 1 и 2:

$$k_{\text{ом}} = \frac{10}{3} = 3,33,$$
$$W_{\text{окм}} = \frac{1/3,33}{2 \cdot 0,005p + 1} = \frac{0,3}{0,01p + 1}.$$

Передаточная функция звена механической части:

$$W_m(p) = \frac{1}{J_\Sigma p}, \quad (3)$$

$$W_m(p) = \frac{1}{0,5259}.$$

Передаточная функция П-регулятора скорости, настроенного на симметричный оптимум имеет следующий вид:

$$W_{pc}(p) = k_{pc}. \quad (4)$$

Коэффициент k_{pc} определяется выражением:

$$k_{pc} = \frac{J_\Sigma}{4T_\mu k_{oc} \frac{1}{k_{om}}}. \quad (5)$$

Коэффициент обратной связи по скорости k_{oc} определяется формулой:

$$k_{oc} = \frac{U_{zc}}{\omega_m}, \quad (6)$$

где $U_{zc} = 10$ В – максимальное значение сигнала управления; $\omega_m = 52$ рад/с – максимальная скорость двигателя во время цикла.

По формулам 4-6:

$$k_{oc} = \frac{10}{52} = 0,192,$$

$$k_{pc} = \frac{0,5295}{4 \cdot 0,005 \cdot 0,192 \cdot \frac{1}{0,136}} = 455.78.$$

С регулятора скорости формируется сигнал задания на момент, необходим блок ограничения с границами ± 20 В, т.к. перегрузочная способность двигателя по моменту $\lambda=2$.

Для преобразования угловой скорости на выходе контура скорости в линейную необходимо следующее звено:

$$k_{и} = \frac{D}{2i_{ред}}, \quad (7)$$

$$k_{и} = \frac{0,12}{25} = 0,0048,$$

где $D = 0,12$ м – диаметр выходного вала редуктора; $i_{ред} = 12,5$ – передаточное число редуктора.

После преобразователя скорости необходим интегратор для получения перемещения на выходе контура положения.

Для реализации нелинейного регулятора положения необходимо определить границы малых, средних и больших перемещений.

$\Delta U_{п\ min}$ и $\Delta U_{п\ max}$ определяется по следующим формулам:

$$\Delta U_{п\ min} = 2\varepsilon_{max}k_{оп}k_{и}(16T_{\mu})^2, \quad (8)$$

$$\Delta U_{п\ max} = \frac{\omega_{ном}^2 k_{оп} k_{и}}{2\varepsilon_{max}}. \quad (9)$$

Максимальное ускорение $\varepsilon_{max}=17,33$ рад/с². Коэффициент обратной связи по положению $k_{оп}$ вычисляется по формуле:

$$k_{оп} = \frac{U_{зп}}{S_{м}}, \quad (10)$$

где $U_{зп}=10$ В – максимальное значение сигнала управления; $S_{м}=2,5$ м – максимальное перемещение платформы.

Тогда по формулам 8-10:

$$k_{оп} = \frac{10}{2,5} = 4;$$

$$\Delta U_{п\ min} = 2 \cdot 17,33 \cdot 4 \cdot 0,0048 \cdot (16 \cdot 0,005)^2 = 0,00426 \text{ В},$$

$$\Delta U_{п\ max} = \frac{52^2 \cdot 4 \cdot 0,0048}{2 \cdot 17,33} = 1,497 \text{ В}.$$

Для области малых перемещений ($U_3 < 0,00426$ В) коэффициент регулятора $k_{рпм}$ вычисляется по формуле:

$$k_{рпм} = \frac{k_{ос}}{16T_{\mu}k_{оп}k_{и}}, \quad (11)$$

$$k_{рпм} = \frac{0,192}{16 \cdot 0,005 \cdot 4 \cdot 0,0048} = 125.$$

Для области средних перемещений ($0,00426 \text{ В} \leq U_3 < 1,497 \text{ В}$) коэффициент регулятора $k_{рпс}$:

$$k_{\text{рпс}} = k_{\text{ос}} \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_{\text{max}}}{k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{и}}}}, \quad (12)$$

$$k_{\text{рпс}} = 0,192 \sqrt{\frac{2 \cdot 17,33}{4 \cdot 0,0048}} = 8,15.$$

В области больших перемещений ($U_3 \geq 1,497$ В) РП выдает сигнал, равный максимальному значению сигнала задания, т. е. ± 10 В.

После регулятора положения необходим задатчик интенсивности ЗИ, т.к. на вход будет подаваться ступенчатый сигнал. ЗИ реализуется в виде последовательно соединенных функций знака (Sign) и интегратора, замкнутых единичной обратной отрицательной связью. Интегратор имеет следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{зи}}(p) = \frac{1}{T_{\text{зи}} p}, \quad (13)$$

где $T_{\text{зи}}$ – постоянная времени ЗИ, определяющая интенсивность, с которой будет формироваться выходной сигнал.

$T_{\text{зи}}$ определяется следующей формулой:

$$T_{\text{зи}} = \frac{U_0}{\varepsilon k_{\text{ос}}}, \quad (14)$$

где $U_0 = 1$ – напряжение ограничения (т.к. перед интегратором блок Sign).

Структурная схема представлена на рисунке 23. Задатчик интенсивности будет иметь вид:

$$T_{\text{зи}} = \frac{1}{17,33 \cdot 0,192} = 0,3.$$

При движении в системе действует постоянный реактивный статический момент. Тогда статический момент будет реализован, как показано на рисунке 4. Сигнал на выходе контура скорости через зону нечувствительности (блок Dead zone) подается на вход функции знака (блок Sign). Таким образом при движении в «положительном направлении» блок Sign выдает «1», при движении в «отрицательном направлении» - «-1», и при отсутствии движения «0». Сигнал с выхода блока Sign перемножается со значением статического момента (задается

константой) и результат подается на отрицательный вход сумматора. Т. к. регулирование подчиненное, при запуске система не сможет снять знак скорости до того, как сформирован статический момент. Для этого необходим блок Memory, выполняющий алгебраическую развязку.

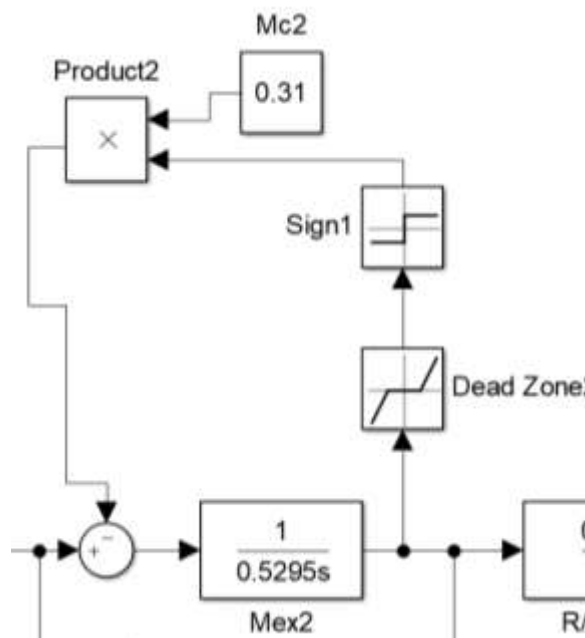


Рисунок 22. Реализация реактивного момента

Переключение между регулированием по положению и регулированием по скорости организовано с помощью переключателя Switch, которые управляются отдельным сигналом, в действительности поступающим с контроллера.

Также переключатель Switch необходим перед датчиком интенсивности, чтобы ЗИ работал только при управлении по положению.

Структурная схема и математическая модель и САУ, также результат обработки системой сигнала задания отображены на рисунках 23-27.

Математической моделью САУ и ее понимание – это количественное представление нереальных величин. Математическая модель является специальным способом представления системы с помощью математических средств, таких как уравнения, интегралы, дифференциалы, разности и т.д.

На начальном процессе проектирования системы автоматического управления ставятся ограничения по их качественным описаниям и на основе анализа схемы. Такое описание становится содержательным или стандартным.

Стандартное описание САУ является построение алгоритма ее работы и функционирования. Это является основой для дальнейшего математического описания.

Недостаток такого описания системы автоматического управления является то, что в таком случае идет оперирование не количественными характеристиками, следовательно такое описания является не точным. Для исследования нужной нам системы надо оперировать качественной характеристикой, она будет определять качество работы. Центральным в понятии САУ является значение модели или оператора системы. В основе любого математического описания лежат реальные значения и величины, полученные при расчете. Оперировать примерными данными сложно, и может привести к ошибке при построении САР.

На рисунке 23 изображена структурная модель САР. Она отображает основные пункты построения математической модели проектируемого механизма. Данная система приходит в работу от сигнала задающего значения от контроллера. Затем осуществляется сравнение с ошибкой регулирования по положению. Полученное значение идет на регулятора положения, где в зависимости от значения на входе регулятор положения выдает соответствующее значение. После этого сигнал идет в задатчик интенсивности, где ограничивается максимальный момент приводного вала двигателя консоли для перемещения. Затем сигнал поступает на сравнение с ошибкой регулирования по скорости и на регулятора скорости. Там происходит вычисление динамического момента данной системы. Оптимизированный контур момента переводит данное значение в реальные единицы и дальше последующие контуры осуществляют перевод в скорость угловую, линейную. И в конце в перемещение системы. Все значения через коэффициенты заносятся в осциллограф, где мы можем наблюдать результаты моделирования.

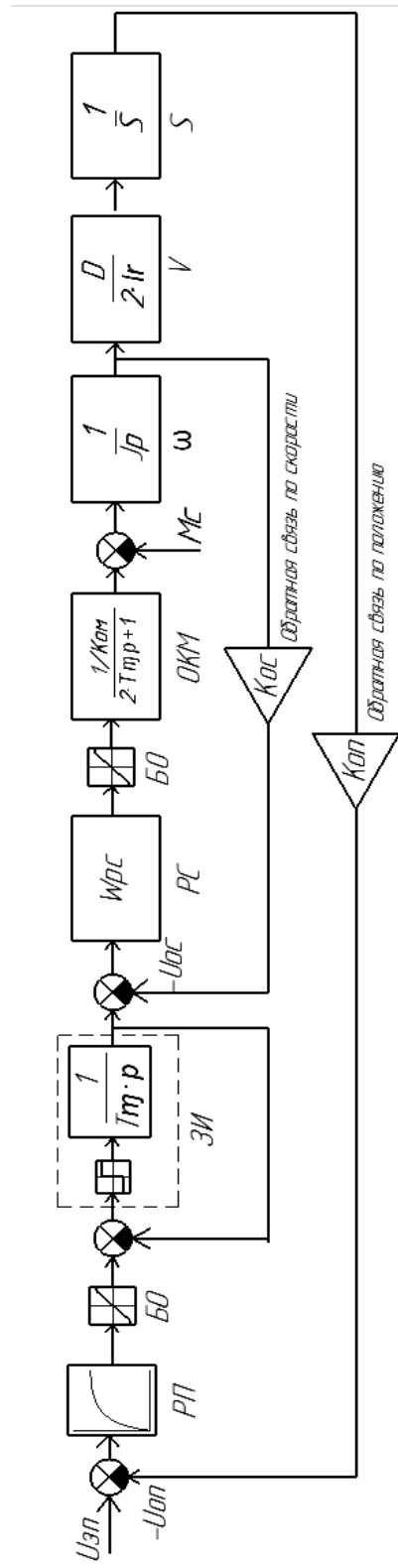


Рисунок 23. Структурная схема САР

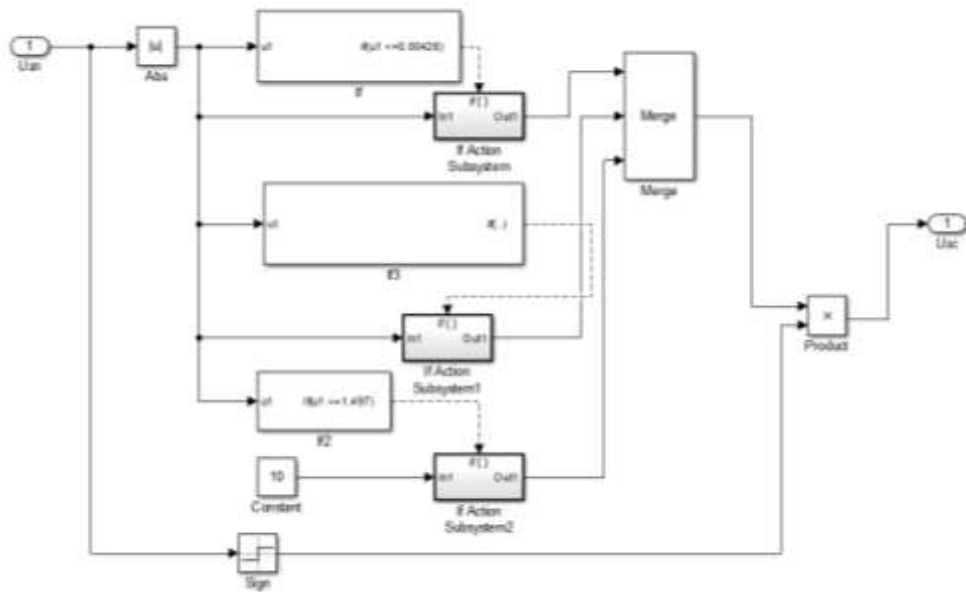


Рисунок 24. Регулятор положения

Нелинейный регулятор положения осуществляет точное и быстрое позиционирование системы в пространстве в зависимости от значения ошибки регулирования по положению.

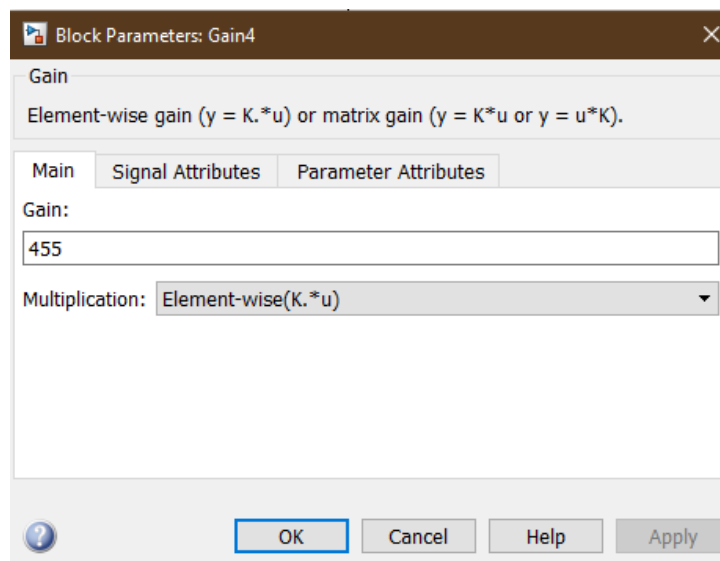


Рисунок 25. П-регулятор

На рисунке 25 изображено окно настройки П-регулятора скорости. В системе моделирования Matlab можно осуществить несколько способов реализации П-регулятора. Первый – блоком Gain, который просто является константой. Вторым – блоком PID rs, который является универсальным для всех трех вариантов осуществления регулирования.

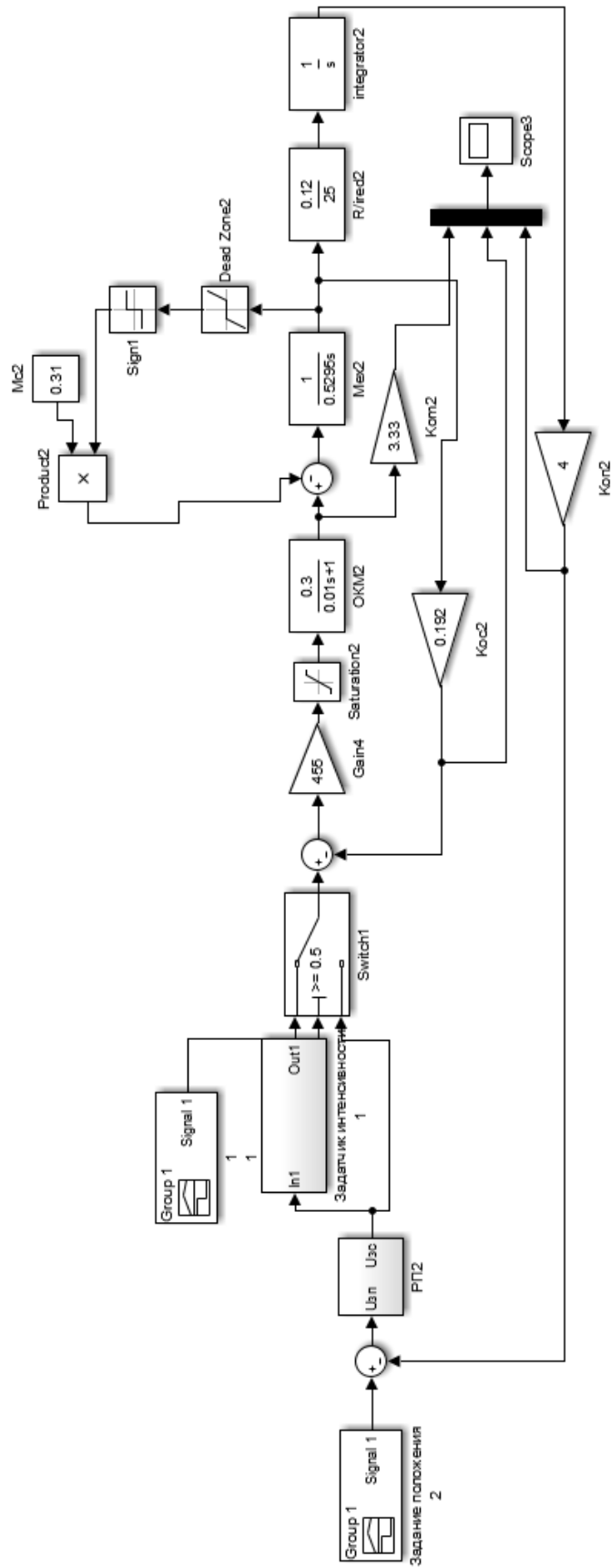


Рисунок 26. Структурная хема САУ

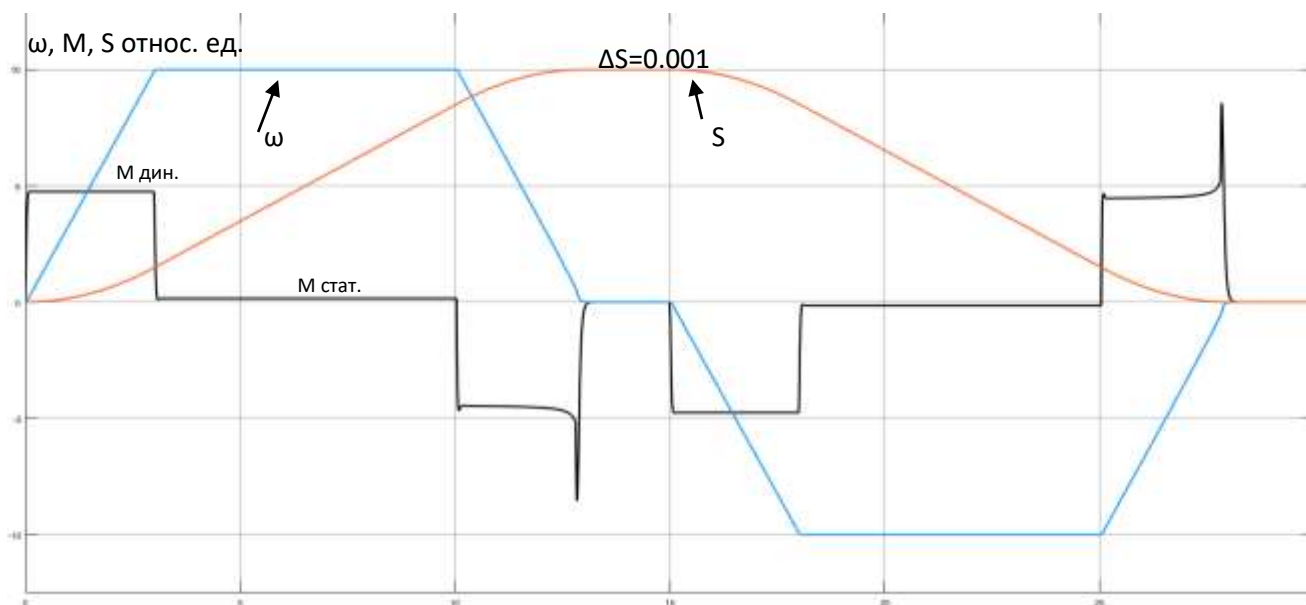


Рисунок 27. Результаты моделирования

Как видно из полученных результатов моделирования, система корректно обрабатывает перемещение консоли до заданного значения. Скорость также достигает установившегося значения с допустимой ошибкой регулирования.

Также для исследования правильной работы системы необходимо исследовать обработку малых, средних и больших перемещений.

Обработка системой малых, средних и больших перемещений представлена на рисунках 28-30.

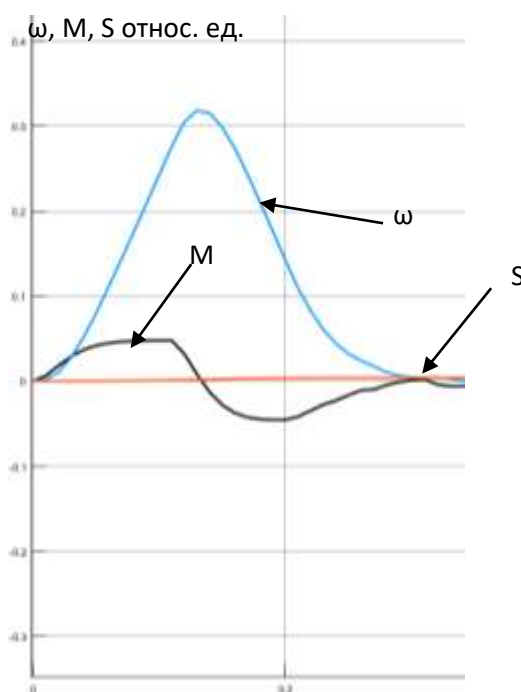


Рисунок 28. Переходные процессы при малых перемещениях

Как видно из графика, при малых перемещениях скорость, момент и перемещение не достигают своих установившихся значений.

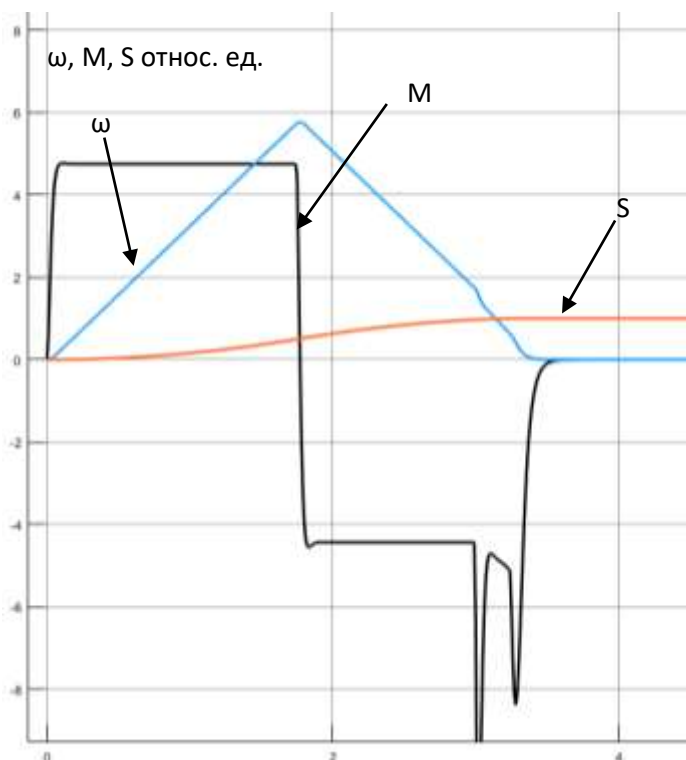


Рисунок 29. Переходные процессы при средних перемещениях

Как видно из графика, момент системы достигает своего установившегося значения. Скорость и перемещение системы нет.

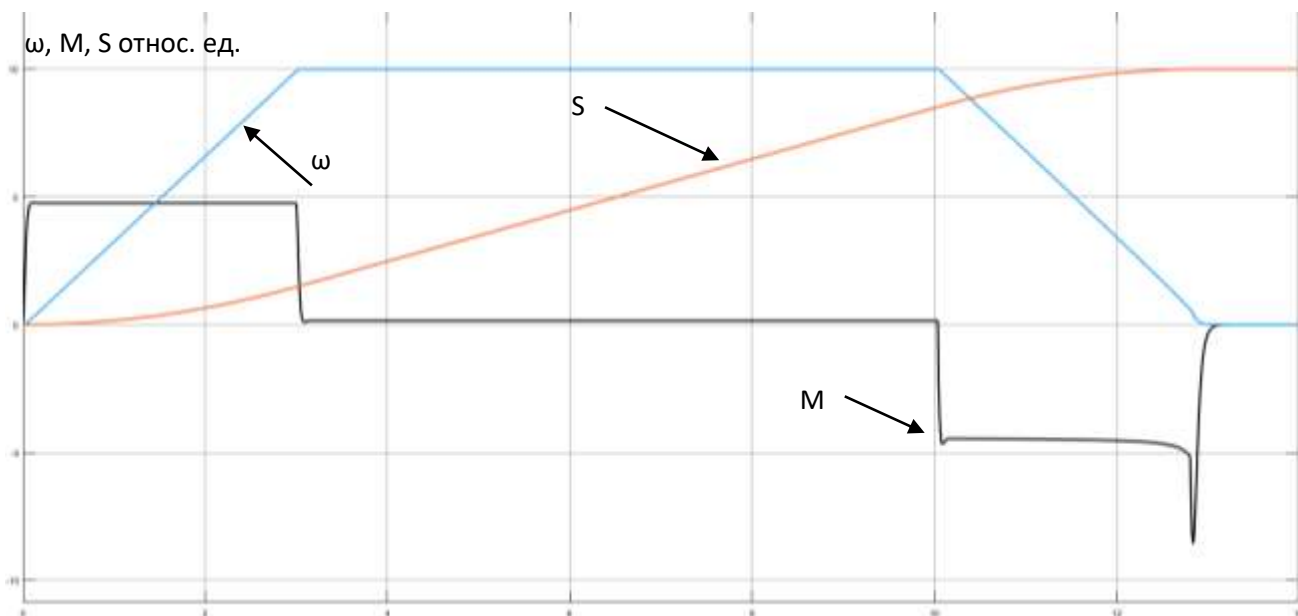


Рисунок 30. Переходные процессы при больших перемещениях

Как видно из графика, скорость, момент и перемещение достигают своих установившихся значений при больших перемещениях.

Как видно из рисунков 28-30 математическая модель системы рассчитана верно. Полученные результаты моделирования полностью удовлетворяют выдвинутым требованиям. Система замены биты на основе робота KUKA и консоли для его перемещения осуществляет плавное движение вдоль рельсового пути между двумя рабочими столами фрезерного обрабатывающего центра. Она плавно останавливается, после этого происходит замена биты фрезерного станка и консоль перемещает робота назад по рельсам консоли.

В ходе изучения технических характеристик выбранного оборудования была разработана оптимальная функциональная схема САР мехатронной системы. Данная схема отображает основные компоненты системы и их взаимодействие. Система управления роботом осуществляет взаимодействие с контроллером фрезерного обрабатывающего центра. Из-за этого происходит полная интеграция одной системы в другую и их взаимодействие. В основе этого взаимодействия лежит программное обеспечение KUKA CNC Sinumerik. Оно осуществляет взаимодействие между двумя системами управления, осуществляет безопасный процесс взаимодействия.

Контуры регулирования технологических координат были разработаны с учетом данных о технологическом процессе агрегата, массогабаритных данных механизма и требований к приводам и системе автоматизации. Эти данные были взяты с учетом планируемых нагрузок и возможной аварийной работы агрегата вследствие перегрузки. Также были рассмотрены различные уровни системы защиты системы от неправильного перемещения и управления, а также взаимодействие с человеком. Данная система оборудуется многоуровневой системой защиты от вмешательства человека.

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

3.1 Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции

ООО «ЧКЗ» расположен в Красноармейском районе города Челябинска на 14 километре Автодороги Челябинск-Новосибирск. Предприятие является значимым производством в России и производит продукцию для таких компаний как Газпром, Роснефть, Лукойл, Фортум, ЧТЗ, Мечел, Северсталь. Предприятие производит компрессорные и насосные установки для нефте-и газодобывающей, горнодобывающей промышленности, предприятий металлургической отрасли и железной дороги. Производство сочетает в себе полуавтоматическое изготовление деталей, ручную сборку агрегатов и узлов, и полный цикл испытаний и исследований каждого готового изделия. ООО «ЧКЗ» обеспечивает высокое качество выпускаемой продукции и сервисное сопровождение компрессорных и насосных станций.

Участок изготовления и обработки материалов осуществляет производство основных частей корпусов компрессоров и насосных установок. На нем происходит изготовление деталей на различных станках с ЧПУ, одним из которых является фрезерный обрабатывающий центр Heckert CWK 1250. Производительность данной линии можно повысить, автоматизировав замену биты фрезерного обрабатывающего центра.

3.2 Расчёт производственной программы цеха

Чтобы рассчитать производственную программу, необходимо сравнить баланс времени работы проектируемого агрегата по замене биты фрезерного станка. При данном расчете также определяется календарное, фактическое и номинальное время работы механизма за год.

Все время работы станка считается календарным, независимо от времени простоя и ремонтов оборудования. Фрезерный станок находится в работе целый

год (366 дней) и в перерасчете на календарное время стоит учесть что он работает 16 часов в сутки. Тогда $T_{\text{кал}}$ составит 5856 часов [11]. Это время является календарным и из него ведется расчет.

Фрезерный обрабатывающий центр не работает в выходные и праздничные дни, следовательно, номинальное время определяется вычитанием из календарного времени остановок на капитальные и текущие ремонты [7]:

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{кал}} - T_{\text{кр}} - T_{\text{тр}} - (T_{\text{пд}} + T_{\text{вд}}), \quad (1)$$

$$T_{\text{ном}} = 5856 - 120 - 592 - 1888 = 3256 \text{ ч},$$

где $T_{\text{кр}}$ – время, которое затратили на капитальные ремонты, получается путем замеров количества часов, потраченных на данный вид ремонта; $T_{\text{тр}}$ – время, которое потратили на текущие ремонты; $T_{\text{тр}}$ – время которое потратили на текущие ремонты, полученное путем замеров времени, затраченных на капитальные ремонты; $T_{\text{пд}}$ – нерабочее время в праздничные дни; $T_{\text{вд}}$ – нерабочее время в выходные дни.

Время простоев в выходные и праздничные дни было рассчитано как произведение 118 выходных и праздничных дней на 16 часовой рабочий день:

$$T_{\text{пд}} + T_{\text{вд}} = 118 \cdot 16 = 1888 \text{ ч.}$$

Номинальное время составляет 3256 часов, что соответствует:

$$\frac{3256}{16} = 203,5 \text{ раб. д.}$$

На замену биты каждый день уходит 4 часа, т.е. время на внеплановые ремонты и простои, следовательно:

$$4 \cdot 203,5 = 814 \text{ часов.}$$

При вычитании из номинального времени простоев и аварий получаем фактическое время работы механизма.

Ниже в таблице 10 представлен баланс рабочего времени фрезерного обрабатывающего центра:

Таблица 10. Баланс рабочего времени агрегата

Плановые ремонты		Номинальное время, $T_{\text{ном}}$, ч	
Капремонт $T_{\text{кр}}$, ч	Текущие $T_{\text{тр}}$, ч	Текущие простои $T_{\text{пр}}$, ч	Фактически е время $T_{\text{ф}}$, ч
		Внеплановые ремонты и остановки $T_{\text{впр}}$, ч	
120	592	814	2442

Объем производства в год продукции определяется производственной мощностью агрегата на единицу рабочего времени и фондом рабочего времени:

$$W_{\text{г}} = P \cdot T_{\text{факт}} = 2434 \text{ шт}, \quad (2)$$

где $T_{\text{факт}} = 2442$ ч – фактическое время работы агрегата; P – производительность фрезерного станка, шт.

Средняя часовая производительность фрезерного станка определяется по формуле:

$$P = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{качеств.}} = 1 \cdot 0,99 = 0,99, \quad (3)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная производительность фрезерного станка; $K_{\text{качеств.}}$ – коэффициент качественных товаров, равный 99% от общего числа произведенных деталей.

Программа производства является основным разделом годового плана развития данного предприятия. В нем определяются объем и параметры изготовления продукции, ее ассортимент и номенклатуру. Ниже приведены основные разделы для предприятий, в товарном производстве:

- Смета по номинальному производству готовой продукции;
- Смета выпуска готового оборудования, идущего на экспорт;
- Смета по повышению объема и качества выпускаемой продукции;
- Смета реализации готовой продукции.

Ниже в таблице 11 представлен расчет производственной программы цеха:

Таблица 11. Расчет производственной программы цеха

	До модерн.	После модерн.
Показатели	Величина	Величина
Календарное время, ч	5856	5856
Нерабочее время, ч	1888	1888
Капитальные текущие ремонты, ч	120	120
Номинальное время, ч	3256	3256
Текущие простои, ч	814	16
Фактическое время работы, ч	2442	3240
Часовая производительность агрегата, шт	0,99	0.99
Производственная программа за год, шт	2434	2704

3.3 Расчет сметы капитальных затрат

На основании спецификации составляется перечень необходимого оборудования. Цены принимаются исходя из прейскуранта оптовых цен производителей.

Расчет себестоимости приобретенного оборудования представлен в таблице 12 [8].

Смета капитальных затрат это – план предполагаемых направлений приобретения долгоиграющих активов и соответствующих средств финансирования этих затрат.

Номинальные средства – материальные активы, которые предприятие содержит с целью использования их в процессе производства или поставки товаров, предоставления услуг, сдачи в аренду другим лицам или для осуществления административных и социально-культурных функций, ожидаемый срок полезного использования, эксплуатации, которых более одного года.

Таблица 12. Расчет стоимости приобретенного оборудования

Наименование оборудования	Кол-во. шт.	Цена за единицу продукции, тыс.руб.	Общая стоимость, тыс.руб.
Робот KUKAKR 270 R2700 ultra	1	2 800	2 800
Консоль для перемещения KL 4000	1	940	940
Блок управления KR C4	1	1 120	1 120
Сенсор KUKA _3DPerception	1	50	50
Датчик абсолютных значений Siemens 6FX2001-5FN13	1	50	50
Другое неучтенное оборудование			248
Итого тыс.руб			5 208

Цена оборудования, которое не учли принимаем в размере 5% от стоимости купленного оборудования.

Стоимость установки определим в размере 15% от стоимости оборудования (10% на демонтаж), транспортные расходы - 5%, резерв на непредвиденные расходы - 5%:

$$M = 0,15 \cdot 4960 = 774 \text{ тыс. руб.},$$

$$T = 0,05 \cdot 4960 = 248 \text{ тыс. руб.},$$

$$P = 0,05 \cdot 4960 = 248 \text{ тыс. руб.}$$

Общие затраты на реконструкцию фрезерного обрабатывающего центра можно, вычислить просуммировав все расходы:

$$K = C_{об} + M + T + P, \quad (4)$$

$$K = 5\,208 + 774 + 248 + 248 = 6\,478 \text{ тыс. руб.}$$

3.4 Расчет РСЭО до внедрения проектируемых мероприятий

В данном разделе считаются расходы на содержание и эксплуатацию оборудования. Расходы на эксплуатацию, связанные с работой оборудования состоят из:

- Траты на электроэнергию (Э);
- Отчисления по амортизации (А);
- Затраты на ремонты (М): запасные части, инструменты, инвентарь, материалы.

Затраты на эксплуатацию данной системы электропривода (Р) можно посчитать по формуле:

$$P = Э + А + М. \quad (5)$$

Затраты на электроэнергию определяется следующей формулой:

$$Э = P_{э} \cdot T_{факт} \cdot Ц_{э}, \quad (6)$$

где Р – мощность на входе установки (номинальная мощность установленной системы составляет 22 кВт, после реконструкции 36 кВт); $T_{факт}$ – фактическое время работы электрооборудования за год, ч; $C_{э}$ – цена за 1 кВт·ч. электроэнергии равна 3,5 руб. Затраты на электроэнергию до и после реконструкции:

$$Э_1 = P_{э} \cdot T_{факт} \cdot Ц_{э}, \quad (7)$$

$$Э_1 = 22 \cdot 2442 \cdot 3,5 = 188\,034 \text{ руб.}$$

После реконструкции время работы фрезерного обрабатывающего центра увеличивается. Роботизированная система работает 16 часов и потребляет 14 кВт в час [9].

$$Э_2 = P_{э} \cdot T_{факт} \cdot Ц_{э} + P_{уст} \cdot T_{уст} \cdot Ц_{э}, \quad (8)$$

$$Э_2 = 22 \cdot 3240 \cdot 3,5 + 14 \cdot 16 \cdot 3,5 = 250\,264 \text{ руб.}$$

Сумма годовых амортизационных отчислений производится на основе суммирования нормы амортизации и капитальных затрат на оборудование

Сумма отчислений на амортизацию определяются формулой:

$$A = \frac{C \cdot H_a}{100}, \quad (9)$$

где H_a – норма амортизации, %; C – стоимость первоначального оборудования руб.

Первоначальная стоимость фрезерного обрабатывающего центра составляет 1 500 тыс. руб.

Норму амортизации по оборудованию можно рассчитать по следующей формуле:

$$H_a = \frac{100}{T_a} = \frac{100}{15} = 6,66\%, \quad (10)$$

где H_a – норма амортизации оборудования; T_a – нормативный срок службы оборудования, равный 15-ти годам для нового оборудования. Тогда амортизационные отчисления для нового и старого оборудования:

$$A_1 = \frac{C \cdot H_a}{100} = \frac{1\,500 \cdot 6,66}{100} = 99,9 \text{ тыс. руб.},$$

$$A_2 = \frac{C \cdot H_a}{100} = \frac{(1\,500 + 6478) \cdot 6,66}{100} = 531,3 \text{ тыс. руб.}$$

3.5 Расходы на обслуживание

Новый комплекс на основе робота КУКА имеет достаточно большую надежность. Его необходимо периодически обслуживать по номиналам отработанных машино-часов. Все узлы и агрегаты имеют защиту от воды и пыли, что повышает их устойчивость к внешним воздействиям. Периодически их необходимо смазывать и проводить проверки. Из этого следует что расходы на ремонты увеличатся [7].

$$M_1 = 30 \text{ тыс. руб.},$$

где M_1 – изначальные затраты на ремонт оборудования.

$$M_2 = 70 \text{ тыс. руб.},$$

где M_2 – новые затраты на ремонт оборудования с учетом установленного оборудования. Туда входят затраты на смазку подшипников и движущихся частей роботизированной системы.

РСЭО до и после реконструкции:

$$P1 = Э + A + M, \quad (11)$$

$$P1 = 188,034 + 99,9 + 30 = 317,9 \text{ тыс.руб.}$$

$$P2 = 250,26 + 531,3 + 70 = 851,5 \text{ тыс.руб.}$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 13.

Таблица 13. Результаты расчета РСЭО

Показатели	Значения		
	До реконструкции	После реконструкции	Δ
Затраты на электроэнергию, тыс. руб.	188,034	250,26	62
Затраты на амортизацию, тыс. руб	99,9	531,3	431,4
Затраты на ремонты, тыс. руб.	30	70	40
Итого Расходы на содержание и эксплуатацию, тыс. руб.:	317,93	851,56	533,63

Расчет зарплат на оплату труда со страховыми отчислениями.

Затраты на оплату труда со страховыми отчислениями можно вычислить по следующей формуле [10]:

$$З = ЗП + О, \quad (12)$$

где ЗП – общий фонд оплаты труда; О – страховые отчисления.

Общий фонд оплаты труда определен суммой основной и дополнительной заработной платой (ЗП) рабочих.

К основной ЗП относится оплата труда рабочих по тарифным ставкам. К дополнительной ЗП относят доплаты компенсирующего, стимулирующего, мотивационного характеров и выплаты с целью регионального регулирования [8].

Количество человеко-часов, необходимое для обслуживания фрезерного обрабатывающего центра складывается из времени, затраченного на капитальный ремонт, ППР, а также внеплановые ремонты, определяется следующей формулой:

$$T_{\text{обс}} = T_{\text{кр}} + T_{\text{ппр}} + T_{\text{вр}}. \quad (13)$$

Время на обслуживание до реконструкции:

$$T_{\text{обс1}} = 120 + 592 + 814 = 1526 \text{ ч.}$$

После реконструкции:

$$T_{\text{обс2}} = 120 + 592 + 16 = 728 \text{ ч.}$$

После модернизации оборудования произошло снижение времени на внеплановые ремонты и простои (на замену биты). Следовательно уменьшилось время присутствия человека во время замены биты:

$$T_1 = T_{\text{обс1}} = 1526 \text{ ч,}$$

$$T_2 = T_{\text{обс2}} = 728 \text{ ч.}$$

Основная заработная плата по ставке 180р/ч, заработная плата составит:

$$ЗП_1 = 180 \cdot 1526 = 274\,680 \text{ руб,}$$

$$ЗП_2 = 180 \cdot 728 = 131\,040 \text{ руб.}$$

Доплаты за работу в ночное время – 40% (или 13,33% для расчета по полной годовой ЗП):

$$Д_1 = 274\,680 \cdot 0.1333 = 36\,614 \text{ руб,}$$

$$Д_2 = 131\,040 \cdot 0.1333 = 17\,467 \text{ руб.}$$

Поощрения для повышения мотивации труда примем в размере 25%:

$$П_1 = 274\,680 \cdot 0.25 = 68\,670 \text{ руб,}$$

$$П_2 = 131\,040 \cdot 0.25 = 32\,728 \text{ руб.}$$

Годовой фонд оплаты труда с учетом районного коэффициента (15%):

$$ЗП_1 = 274\,680 + 36\,614 + 68\,670 + 15\% = 436\,958 \text{ руб,}$$

$$ЗП_2 = 131\,040 + 17\,467 + 32\,728 + 15\% = 208\,420 \text{ руб.}$$

Сумма отчислений на социальные нужды принимаю 30%. Они включают в себя отчисления в пенсионный фонд 22%, территориальный фонд обязательного

медицинского страхования 2,1%, федеральный фонд обязательного медицинского страхования 5,9%:

$$O_1 = 436\,958 \cdot 0.3 = 131\,087 \text{ руб.},$$

$$O_2 = 208\,420 \cdot 0.3 = 62\,526 \text{ руб.}$$

Таким образом затраты на оплату труда со страховыми отчислениями составят:

$$З_1 = 436\,958 + 131\,087 = 568\,045 \text{ руб.},$$

$$З_2 = 208\,420 + 62\,526 = 270\,946 \text{ руб.}$$

После реконструкции затраты на оплату труда уменьшаются на 47%.

3.6 Расчет прибыли и показателей рентабельности итоговых показателей

Чистую прибыль можно вычислить по формуле:

$$П = (Ц_p - С) \cdot (1 - Н) \cdot W, \quad (14)$$

где Ц – стоимость продажи 1 ед. продукции, руб; С – стоимость самой 1 ед. продукции, руб; Н – налог на прибыль, равный 20%.

На данный момент себестоимость продукции составляет $C=580\,000$ руб/шт, реализация происходит по цене $Ц=678\,280$ руб/шт.

Чистая прибыль до реконструкции по формуле:

$$П = (677\,500 - 580\,000) \cdot (1 - 0.2) \cdot 2434 = 191\,371 \text{ руб.}$$

Прибыль с одной единицы продукции составит:

$$П_{\text{одн.шт}} = 78\,000 \text{ руб.}$$

После реконструкции увеличивается производительность агрегата, соответственно увеличилось количество выпускаемой на нем продукции, вследствие чего итоговое количество выпускаемой на заводе продукции тоже возросло. Раньше время на внеплановые ремонты и простои составляло 814 часа, а фактическое время работы агрегата 2442 часа, количество выпускаемой продукции 2434 шт. Для замены биты с помощью роботизированной системы на основе робота KUKA необходимо не более 3 минут, следовательно 6 минут в день.

За год 16 часов. Следовательно время работы увеличится на 798 часов и будет составлять 3240 ч.

Объем продукции увеличится до:

$$W_{\text{ст}} = \frac{2442 \cdot 3240}{2434} = 3250 \text{ шт.}$$

Следовательно количество выпускаемой продукции увеличивается на 29,5%. Это максимальная производительность агрегата.

При этом известно, что 2434 компрессорные установки (первоначальное количество выпускаемой продукции) составляет 90% производственной мощности цеха по данным «ООО ЧКЗ». Следовательно, максимальное количество продукции для цеха будет составлять:

$$W_{\text{цеха}} = \frac{2434}{0,9} = 2704 \text{ шт.}$$

Цех может обеспечить производство 2704 единиц продукции в год, следовательно мехатронная система также будет обрабатывать 2704 ед. продукции в год.

После реконструкции себестоимость единицы продукции увеличилась на:

$$\frac{\Delta \text{РСЭО}}{W_{\text{цеха}}}, \quad (15)$$
$$\frac{\Delta \text{РСЭО}}{W_{\text{цеха}}} = \frac{533,63}{2704} = 197 \text{ руб.}$$

Тогда после реконструкции прибыль составит:

$$\Pi = (677\,500 - 580\,197) \cdot (1 - 0.2) \cdot 2704 = 210\,485 \text{ тыс. руб.}$$

Разница в прибыли до и после реконструкции составляет:

$$\Delta \Pi = 210\,485 - 191\,371 = 19\,114 \text{ тыс. руб.}$$

Ниже приведена таблица технико-экономических показателей предприятия.

3.7 Расчет срока окупаемости проекта

Полная сумма всех затрат (капитальные затраты) на реализацию данного проекта будет состоять из себестоимости оборудования, его установки, доставки:

$$K = 6478 = 6478 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости проекта можно вычислить по формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{P \cdot k_{\%}}, \quad (16)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{6478}{210\,485 \cdot 0.01} = 3 \text{ года,}$$

где k – доля от прибыли фрезерного обрабатывающего центра.

Доля от прибыли фрезерного обрабатывающего центра составляет 1% от общей прибыли. По данным «ООО ЧКЗ» все обрабатывающие центры и станки, производящие детали для компрессорных установок составляют от 0,5% до 1% в прибыли предприятия, поскольку на нем преобладает ручная сборка продукции.

P – прибыль;

K – капитальные затраты.

Ниже в таблице 14 приведены сравнительные данные до и после реконструкции фрезерного обрабатывающего центра.

3.8 Сводная таблица технико-экономических показателей

Ниже в таблице 14 представлены сводные технико-экономические данные экономических расчетов.

После реконструкции изменились расходы на РСЭО и заработная плата сотрудников. Максимальная производительность агрегата по расчетам после реконструкции увеличилась на 30%. Поскольку цех работает на 90% от максимальной производительности, при выходе на максимальную производственную мощность, количество продукции составит 2704 ед./год.

Себестоимость продукции, вследствие введенных изменений, увеличивается на 197 руб. Срок окупаемости мехатронной системы замены биты фрезерного обрабатывающего центра Neckert CWK 1250 составит 3 года.

Таблица 14. Сводная таблица технико-экономических расчетов

Параметры	Величина		
	До реконструкции	После реконструкции	Δ
Внеплановые ремонты, ч	814	16	-798
Фактическое время, ч	2442	3240	798
Производительность, шт.	2434	2704	270
Производственная программа тыс. руб.	191 371	210 485	19 114
Прибыль с единицы продукции, руб.	78 000	77 803	197
Капитальные вложения, тыс. руб.		6 478	6478
Затраты на электроэнергию тыс. руб.	188,034	250,260	62,226
Амортизационные отчисления, тыс. руб.	99,9	531,3	431,4
Затраты на ремонты, тыс. руб.	30	70	40
РСЭО, тыс. руб.	317,93	851,56	533,63
Фонд оплаты труда, тыс. руб.	568,05	270,9	297,1
Срок окупаемости	3 года		

Из расчетов следует, что проектируемая система имеет положительный эффект на производство компрессорных установок и ее экономически эффективно внедрять в производство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведя анализ технологического процесса, было установлено, что участок производства деталей компрессорных установок можно улучшить путем автоматизации замены биты фрезерного обрабатывающего центра Neckert CWK 1250.

Исходя из особенностей данного технологического процесса были выдвинуты требования к системе привода и автоматизации. Произведя расчеты, был выбран двигатель Simotics 1FK7101 мощностью 1,5 кВт, который прошел проверки по нагреву и перегрузочной способности. Для его управления был выбран частотный преобразователь SINAMICS G120.

Построена архитектура системы автоматизации на основе программного обеспечения KUKA.CNC Sinumerik, которое объединяет систему управления фрезерного обрабатывающего центра (Siemens SINUMERIK 840D sl) и систему управления Kuka KR C4, соединенных между собой по интерфейсу Profinet. Для точного позиционирования робота и его захвата относительно заменяемой биты используется KUKA _3D Perception. Для точного позиционирования консоли для перемещения робота KL 4000 используется датчик абсолютных значений Siemens 6FX2001-5FN13. Эта система обеспечивает реализацию обратной связи по положению и точное позиционирование робота с заданным диапазоном погрешности.

Разработаны функциональные и структурные схемы САР двигателя консоли для перемещения робота. В среде Matlab построена математическая модель системы перемещения консоли. В результате моделирования получен необходимый технологический процесс, удовлетворяющий заданным требованиям.

Произведя технико-экономический расчет, были определены капитальные затраты на реализацию данной системы. При ее установке увеличивается производство выпускаемой продукции на 10%, что позволяет увеличить прибыль от сбыта продукции 10% соответственно. Срок окупаемости данной системы

составляет 3 года. Данные расчеты показывают экономическую эффективность внедрения данной мехатронной системы.

Таким образом, все задачи, поставленные в начале работы выполнены, а цели достигнуты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Официальный сайт ООО «Челябинский компрессорный завод». – <https://www.chkz.ru/>.
2. Официальный сайт компании KUKA Russia. – <https://www.kuka.com/ru-ru/>.
3. Официальный сайт компании Siemens global. – <https://new.siemens.com/global/>.
4. Г.И. Драчев. Теория электропривода: учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 36 – 75.
5. А.Е. Шейнблит. Курсовое проектирование деталей машин: учебное пособие. Изд-е 2-е, перераб. и дополн. – Калининград: Янтар. сказ. 2002. – С. 432 – 439.
6. Электропривод: учебное пособие. / сост. С. В. Петухов, М.В. Кришьянис. – Архангельск: С(А)ФУ, 2015. – 303 с.
7. Кучина Е.В. Экономика организации: учебное пособие / Е.В. Кучина. – Челябинск, 2017. – 52 с.
8. Определение экономической эффективности технических решений в дипломных проектах: методические указания/ сост. Т.В. Попп. – Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 30 с.
9. Методические указания по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции на предприятиях цветной металлургии. – Утвержден председателем Комитета РФ по металлургии 7 декабря 1993г. – М.: МПС РФ, 1998.
10. Оценка эффективности внедрения инвестиционных проектов: методические рекомендации по оценке и расчетам. – М.: МПС РФ, 1998. – 16 с.
11. Производственный календарь на 2020 год. – <http://www.consultant.ru/>.